



DISERTASI - TE 143597

Pengembangan Strategi Kontrol Optimal Pada PMSG *Wind Turbine* Melalui Sistem Penyimpan Energi Berbasis Algoritma *Swarm Intelligence*

RATNA IKA PUTRI
2214301004

DOSEN PEMBIMBING

Prof. Dr. Ir. Mauridhi Hery Purnomo, M.Eng.
Dr. Ardyono Priyadi, S.T, M.Eng
Dr. Ir. Margo Pujiantara, M.T

PROGRAM DOKTOR
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2017

LEMBAR PENGESAHAN

Disertasi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Doktor
(Dr)

Di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Oleh:

Ratna Ika Putri
NRP. 224301004

Tanggal Ujian : 19 Juni 2017
Periode Wisuda : September 2017

Disetujui oleh:

1. Prof. Dr.Ir. Mauridhi Hery Purnomo, M.Eng. (Pembimbing I)
NIP. 195809161986011001
2. Dr. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng. (Pembimbing II)
NIP. 197309271998031004
3. Dr. Ir. Margo Pujiانتara, MT. (Pembimbing III)
NIP. 197311192000031001
4. Prof. Dr/Ir. Rudy Setiabudy, DEA. (Penguji I)
NIP. 195410071984031001
5. Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT. (Penguji II)
NIP. 19741129 2000121001
6. Dr. Dimas Anton Asfani, ST., MT. (Penguji III)
NIP. 19810905 2005011002

Mengetahui
Dekan Fakultas Teknologi Elektro

Dr. Ir. Arief Sardjono, S.T., M.T.
NIP. 197002121995121001

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Disertasi saya dengan judul **“Pengembangan Strategi Kontrol Optimal Pada PMSG *Wind Turbine* Melalui Sistem Penyimpan Energi Berbasis Algoritma Swarm Intelligence”** adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Juli 2017



Ratna Ika Putri
NRP. 2214301004

PENGEMBANGAN STRATEGI KONTROL OPTIMAL PADA PMSG WIND TURBINE MELALUI SISTEM PENYIMPAN ENERGI BERBASIS ALGORITMA SWARM INTELLIGENCE

Nama Mahasiswa : Ratna Ika Putri
NRP : 2214 301 004
Promotor : Prof. Dr. Ir. Mauridhi Hery Purnomo, M.Eng.
Co – Promotor 1 : Dr. Ardyono Priyadi, S.T, M.Eng
Co – Promotor 2 : Dr. Ir. Margo Pujiantara, M.T

ABSTRAK

Ketersediaan energi fosil yang semakin menipis dan pencemaran emisi gas rumah kaca sebagai akibat penggunaan bahan bakar fosil menuntut untuk dikembangkan energi terbarukan. Salah satu energi terbarukan yang memiliki potensi di Indonesia yaitu energi angin. Sumberdaya energi angin di berbagai wilayah Indonesia berkisar antara 2,5 – 5,5m/s dan termasuk dalam kategori kecepatan angin kelas rendah hingga menengah. Kelemahan pemanfaatan energi angin yaitu kecepatan angin yang berfluktuasi dengan cepat dan tidak menentu sehingga akan menghasilkan daya yang berfluktuasi pula tergantung pada kecepatan angin. Sistem konversi energi angin (SKEA) akan menghasilkan daya optimal jika beroperasi pada titik daya maximum sehingga kontrol optimal dan maximum power point tracking dibutuhkan untuk mendapatkan daya optimal.

Tujuan dari penelitian adalah mendesain kontrol optimal pada sistem konversi energi angin menggunakan PMSG untuk mengatur aliran daya yang dihasilkan turbin angin ke grid dengan menggunakan baterai sebagai penyimpan energi. Beberapa metode MPPT yang terdiri dari metode konvensional, *artificial intelligence* dan *swarm intelligence* dikembangkan untuk dapat diimplementasikan pada SKEA dan performansi antara metode tersebut dibandingkan. Untuk mengurangi fluktuasi daya yang disebabkan oleh energi angin yang tidak menentu dan tidak dapat diprediksi, sebuah baterai dihubungkan ke dc-link kapasitor melalui konverter *bidirectional* yang dikontrol oleh kontroler PI. Sistem penyimpan energi baterai akan mempertahankan keseimbangan daya selama kelebihan atau kekurangan antara daya yang dihasilkan dan perubahan beban. Metode MPPT dengan algoritma *modified* P&O diimplementasikan dalam perangkat keras menggunakan mikrokontroler pada prototipe SKEA.

Berdasarkan hasil simulasi, algoritma *modified firefly* memiliki performansi terbaik untuk mengekstraks daya optimal dibandingkan dengan metode P&O dan PSO. Sedangkan implementasi algoritma MPPT pada prototipe SKEA *stand alone* menunjukkan algoritma *modified* P&O menghasilkan efisiensi rata-rata sebesar 91.7% sedangkan algoritma *modified Firefly* menghasilkan efisiensi rata-rata sebesar 89.15%. Efisiensi terendah dihasilkan oleh algoritma P&O sebesar 80.05% dengan fluktuasi yang lebih besar

Kata Kunci : PMSG, Kontrol Optimal, Turbin Angin, *Maximum Power Point Control*

DEVELOPMENT OF OPTIMAL CONTROL STRATEGY ON WIND TURBINE PMSG THROUGH ENERGY STORAGE SYSTEM BASED ON INTELLIGENCE SWARM ALGORITHM

Name : Ratna Ika Putri
Student ID : 2214 301 004
Supervisor : Prof. Dr. Ir. Mauridhi Hery Purnomo, M.Eng.
Co – Supervisor 1 : Dr. Ardyono Priyadi, S.T, M.Eng
Co – Supervisor 2 : Dr. Ir. Margo Pujiantara, M.T

ABSTRACT

Availability of diminishing fossil energy and increasing greenhouse gas pollution as result of use of fossil fuel, demand the development of renewable energy. Wind Energy is one of the renewable energy that has the potential in Indonesia. Wind energy resources in various areas Indonesia ranged between 2.5 - 5,5m/s, including wind speed categories of low to medium grade. Weakness of wind energy utilization is wind speeds that fluctuate rapidly and intermittent so that will produce power which fluctuate and depend on wind speed. The wind energy conversion system (WECS) will produce optimal power when operating at maximum power point so optimal control and maximum power point tracking is required to obtain optimal power.

The research purpose is to design optimal control on wind energy conversion system using PMSG to regulate the power generated by wind turbine to grid using battery as energy storage. Some MPPT methods consisting of conventional methods, artificial intelligence and swarm intelligence are developed to be implemented on SKEA and the performance between the methods is compared. To reduce the power fluctuations caused by the intermittent and largely unpredictable nature of wind energy, a battery is connected across the dc-link capacitor via a bidirectional converter that is controlled by a PI controller. The battery storage system assists in maintaining the power balance during surplus or deficit generation conditions and load changes. The MPPT method with P & O modified algorithm is implemented in hardware using microcontroller on SKEA prototype.

Based on the simulation results, the modified firefly algorithm has the best performance to extract the optimal power compared to the P&O and PSO methods. While the implementation of the MPPT algorithm on the stand alone WECS prototype shows the modified P&O algorithm yields an average efficiency of 91.7% while the modified Firefly algorithm yields an average efficiency of 89.15%. The lowest efficiency is generated by the P & O algorithm of 80.05% with greater fluctuations

Kata Kunci : PMSG, Optimal Control, Wind Turbine, Maximum Power Point Control

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT yang telah memberikan taufiq dan hidayah Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan buku disertasi ini yang merupakan hasil penelitian yang telah penulis kerjakan selama menempuh studi program Doktor di Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Karya disertasi ini dapat diselesaikan dengan bantuan banyak pihak, maka pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ucapan terimakasih yang tulus kepada Bapak Prof. Dr. Ir Mauridhi Hery Purnomo, M.Eng, Bapak Dr. Ardyono Priyadi, ST, M.Eng dan Bapak Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT selaku promotor dan co-promotor yang telah membimbing, mengarahkan, mengingatkan, mendorong serta memberikan banyak inspirasi untuk menyelesaikan disertasi ini.

Ucapan terima kasih juga penulis berikan kepada Bapak Prof. Dr. Ir. Rudy Setiabudy, DEA, Bapak Dr. Rony Seto Wibowo, ST, MT dan Bapak Dr. Dimas Anton Asfani ST, MT selaku tim penguji yang memberikan saran dan masukan pada disertasi ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Prof. Toshifumi ISE selaku *international supervisor* yang telah mengarahkan dan membimbing selama penulis mengikuti Program Peningkatan Kualitas Publikasi Internasional (PKPI) 2016 di Osaka University selama 3 bulan.

Tanpa adanya layanan, bantuan dan fasilitas dari pihak manajemen Pascasarjana, tidak lah mungkin bagi penulis untuk menyelesaikan program doktor ini. Penulis ucapkan terima kasih banyak kepada Bapak Dr. Ir. Wirawan, DEA, dan Bapak Dr. Rony Seto Wibowo, ST. MT selaku koordinator dan sekretaris Program Studi Pascasarjana Teknik Elektro ITS, Mbak Ranny, Bapak Hartono, Bapak Supari dan seluruh staff administrasi lainnya yang telah memberikan banyak kelancaran bagi penulis. Tidak lupa penulis ucapkan terima kasih kepada Kementrian Ristekdikti yang telah memberikan beasiswa BPPDN dan PKPI selama menempuh Program Doktor ini.

Banyak pihak yang telah membantu selama menempuh studi Doktor ini. Penulis sangat berterima kasih kepada Bapak Prof. Taufik dari California Polytechnic State University yang telah memberi masukan dan bantuannya dalam penulisan makalah publikasi. Terima kasih banyak penulis berikan kepada Bapak Dr. Lie Jasa, Bapak Dr. Radi, Bapak Dr. Iwan Setiawan, Bapak Dr. Nyoman Sukajaya, Ibu Dr. Irrene Budi S sebagai senior yang telah banyak memberikan masukan dan bantuan kepada penulis, rekan-rekan penulis di LIPIST, Bu Rosmaliati, Bu Irma , Pak Anang, Pak Andi, Pak Aries, Bu Aini, Bu Rosi, Bu Evi, Bu Kindi, Pak Yulianto, Pak Fanani, Bu Rima, Bu Yuhana, Bu Diana, Mas Dimas, Mas wahyu, Mas Isa, adik-adik mahasiswa asisten LIPIST dan teman-teman S2 di LIPIST yang telah menemani, berbagi dan membantu sehingga memberikan kenyamanan dan kegembiraan selama di Lab LIPIST ITS serta teman teman tim *wind turbine* Mas Irwan, Mas Multazam, Evin, Dwiyan, Sefri yang telah membantu dan bekerjasama dalam mengembangkan prototipe turbin angin di Laboratorium, serta teman-teman lain yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Penulis juga ucapkan terima kasih kepada kolega Program Studi Teknik Elektronika Politeknik Negeri Malang yang telah memberikan dorongan selama penulis menempuh studi ini.

Terakhir bagi keluargaku, suami, anak-anak, adikku, Bapak dan ibu ku yang tidak ada satu kata pun yang dapat mewakili rasa terima kasihku atas segala pengertian, pengorbanan, kasih sayang, dorongan dan doa yang telah diberikan kepada penulis selama menempuh studi ini.

Surabaya, Juli 2017

Penulis

DAFTAR ISI

ABSTRAK.....	i
ABSTRACT.....	ii
KATA PENGANTAR.....	iii
DAFTAR ISI.....	iii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL.....	xv
DAFTAR ISTILAH.....	xvi
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah.....	6
1.3 Tujuan Penelitian.....	7
1.4 Manfaat Penelitian.....	8
1.5 Kontribusi dan Kebaharuan Penelitian.....	8
1.6 Posisi dan Roadmap Penelitian	9
1.6.1 Penelitian Sebelumnya.....	9
1.6.2 Roadmap Penelitian	15
BAB 2 SISTEM KONVERSI ENERGI ANGIN	21
2.1 Potensi Energi Angin	21
2.2 Teknologi Turbin Angin.....	23
2.2.1 Turbin Angin Sumbu Vertikal Dan Turbin Angin Sumbu Horisontal	24
2.2.2 <i>Variable Speed Wind turbine</i> dan <i>Fixed Speed Wind turbine</i>	27
2.3 Konfigurasi Sistem Konversi Energi Angin (SKEA)	29
2.3.1 SKEA kecepatan konstan tanpa konverter daya	29
2.3.2 SKEA kecepatan berubah dengan konverter daya <i>partial scale</i>	30
2.3.3 SKEA kecepatan berubah dengan konverter daya <i>full scale</i>	32
2.4 Karakteristik Daya Turbin Angin.....	34
2.5 Topologi Konverter Daya Pada VSWT Dengan PMSG	35
2.5.1 Konverter Back to Back.....	36
2.5.2 Penyearah Dioda	37
2.5.3 Penyearah dioda dan <i>Chopper</i>	38
BAB 3 PEMODELAN SISTEM KONVERSI ENERGI ANGIN DENGAN	
PMSG	41
3.1 Pemodelan Kecepatan Angin	41
3.1.1 Stokastik Petri Net	44
3.1.2 Pemodelan Kecepatan Angin Dengan Stokastik Petri Net	47
3.2 Pemodelan Turbin Angin	52

3.3	Pemodelan <i>Permanent Magnet Synchronous Generator</i> (PMSG).....	54
3.4	Pemodelan konverter Daya.....	59
3.4.1	Konverter Sisi Rotor.....	60
3.4.2	<i>Grid Side Converter</i>	65
BAB 4 OPTIMASI EKSTRAKSI DAYA MAKSIMUM PADA PMSG		
	TURBIN ANGIN.....	68
4.1	Ekstraksi Daya Maksimum Pada SKEA.....	68
4.2	Sistem Konversi Energi Angin Terhubung Ke Grid.....	72
4.3	Ekstraksi Daya Maksimum Dengan Metode Perturb & Observe (P&O)	73
4.3.1	Metode Perturb & Observe (P&O)	74
4.3.2	Hasil Simulasi Ekstraksi Daya Maksimum Dengan Metode Perturb & Observe (P&O).....	77
4.4	Ekstraksi Daya Maksimum Dengan Metode PSO	81
4.4.1	Metode PSO	82
4.4.2	Hasil Simulasi Ekstraksi Daya Maksimum Dengan Metode PSO.....	86
4.5	Ekstraksi Daya Maksimum Dengan Algoritma <i>Modified Firefly</i>	89
4.5.1	Algoritma <i>Modified Firefly</i>	91
4.5.2	Hasil Simulasi Ekstraksi Daya Maksimum Dengan <i>Modified Firefly</i>	95
4.6	Ekstraksi Daya Maksimum Pada PMSG <i>Wind turbine</i> Stand alone	99
4.7	Ekstraksi Daya Maksimum Dengan Algoritma <i>Modified</i> Perturb&Observe .	101
4.7.1	Algoritma <i>Modified</i> Perturb & Observe (P&O).....	102
4.7.2	Hasil Simulasi Ekstraksi Daya Maksimum Dengan <i>Modified</i> P&O.....	107
4.8	Ekstraksi Daya Maksimum Dengan Algoritma Logika Fuzzy	111
4.8.1	Logika Fuzzy.....	113
4.8.2	Hasil Simulasi Ekstraksi Daya Maksimum Dengan Logika Fuzzy	121
4.9	Perbandingan Metode Optimasi Untuk Ekstraksi Daya Maksimum	125
BAB 5 KONTROL OPTIMUM PADA KONVERSI ENERGI ANGIN		
	MENGUNAKAN SISTEM PENYIMPAN ENERGI	134
5.1	Baterai Sebagai Penyimpan Energi	137
5.2	Kontroler Konverter Bidirectional.....	140
5.3	Kontrol Grid Side Converter	143
5.4	Hasil Simulasi Kontrol Optimum Pada Sistem Turbin Angin Terhubung Ke Grid	147
BAB 6 IMPLEMENTASI MPPT PADA SISTEM KONVERSI ANGIN		
	SKALA KECIL	160
6.1	Konversi Energi Angin Stand Alone Berbasis Mikrokontroller.....	160
6.2	Emulator Turbin Angin.....	162
6.3	<i>Permanent Magnet Synchronous Generator</i> (PMSG).....	164

6.4	Penyearah Dioda Gelombang Penuh Tiga fasa	164
6.5	Detektor arus dan Tegangan.....	166
6.5.1	Detektor Arus.....	167
6.5.2	Detektor Tegangan.....	168
6.6	Konverter Boost	170
6.7	Pengujian Peralatan Turbin Angin	174
6.7.1	Hasil Pengujian Penyearah 3 Fasa Tidak Terkendali	174
6.7.2	Hasil Pengujian Detektor Arus	176
6.7.3	Hasil Pengujian Detektor Tegangan	177
6.7.4	Hasil Pengujian Konverter Boost	178
6.7.5	Hasil Pengujian Karakteristik Daya Turbin Angin.....	182
6.8	Implementasi MPPT Pada Peralatan Turbin Angin	185
6.9	Hasil Implementasi Ekstraksi Daya Maksimum Dengan Algoritma <i>Modified</i> Perturb&Observe	189
6.9.1	Hasil Pengujian Pada Kecepatan Angin Konstan	189
6.9.2	Hasil Pengujian Implementasi <i>Modified</i> P&O Sebagai MPPT Pada Kecepatan Angin Berubah	196
BAB 7 PENUTUP		199
7.1	Kesimpulan	199
7.2	Penelitian Selanjutnya.....	200
DAFTAR PUSTAKA		202
LAMPIRAN		

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Diagram Tulang Ikan Penelitian	18
Gambar 1. 2 Road Map Penelitian	19
Gambar 2. 1. Potensi Energi Angin Di Indonesia	21
Gambar 2. 2. Hasil Pengukuran Kecepatan Angin Rata Bulanan Di Nganjuk	22
Gambar 2. 3 Hasil Pengukuran Kecepatan Angin Rata Harian Di Nganjuk	23
Gambar 2. 4 Turbin Angin Sumbu Horisontal	24
Gambar 2. 5 Turbin Angin Sumbu Vertikal	25
Gambar 2. 6 Jenis Turbin Angin Berdasarkan Orientasi Putaran Sumbu	26
Gambar 2. 7 SKEA Dengan Kecepatan Konstan Tanpa Konverter Daya	29
Gambar 2. 8 SKEA Dengan <i>Wound Rotor Induction Generator</i>	30
Gambar 2. 9 SKEA Kecepatan Berubah Dengan <i>Double Fed Induction Generator</i>	31
Gambar 2.10 SKEA Kecepatan Berubah Dengan Konverter Daya <i>Full Scale</i>	33
Gambar 2.11 SKEA Kecepatan Berubah Dengan Konverter Daya <i>Full Scale</i> Tanpa Gearbox	33
Gambar 2.12 Kurva Daya Turbin Angin	34
Gambar 2.13 Konverter <i>Back to Back</i> Pada VSWT Dengan PMSG	37
Gambar 2.14 Penyearah Dioda Pada VSWT Dengan PMSG	38
Gambar 2.15 Penyearah Dioda Dengan <i>Chopper</i> Pada VSWT Dengan PMSG	38
Gambar 3. 1 Pemodelan Dengan SPN	46
Gambar 3. 2 Data Hasil Pengukuran Kecepatan Angin Di Nganjuk	47
Gambar 3. 3 Model SPN Untuk Kecepatan Angin	48
Gambar 3. 4 Model Kecepatan Angin Dengan SPN	50
Gambar 3. 5 Histogram dari Model Data Kecepatan Angin	52
Gambar 3. 6 Pemodelan Turbin Angin Dengan Simulink	53
Gambar 3. 7 Hubungan Antara TSR dan Koefisien Daya (C_p)	53
Gambar 3. 8 Karakteristik Turbin Angin	54
Gambar 3. 9 Rangkaian Ekuivalen PMSG	55
Gambar 3.10 Model Sederhana PMSG Dalam Sumbu dq	57
Gambar 3.11 Pemodelan PMSG Menggunakan Simulink	57
Gambar 3.12 Hasil Simulasi Kecepatan Generator dan Torsi PMSG	59
Gambar 3.13 Hasil Simulasi Daya dan Tegangan PMSG	59
Gambar 3.14 Pemodelan Konverter Sisi Rotor Dengan Simulink	60
Gambar 3.15 Rangkaian Penyearah Dioda Tiga Fasa	60
Gambar 3.16 Hasil Simulasi Tegangan dan Arus Keluaran Penyearah	62
Gambar 3.17 Rangkaian Konverter Boost	63
Gambar 3.18 Hasil Simulasi Tegangan dan Arus Keluaran Konverter Boost	64

Gambar 3.19 Rangkaian Ekvivalen GSC dalam Model dq.....	66
Gambar 3.20 Pemodelan Konverter Sisi Grid Pada Simulink Matlab.....	66
Gambar 3.21 Hasil Simulasi Tegangan Grid	67
Gambar 4. 1 Kurva MPPT Berdasarkan Hubungan Kecepatan Rotor dan Daya Generator	68
Gambar 4. 2 Karakteristik Koefisien Daya Sebagai Fungsi TSR	69
Gambar 4. 3 Kurva Torsi Optimum	71
Gambar 4. 4 Sistem Konversi Energi Angin Terhubung Ke Grid	73
Gambar 4. 5 Pemodelan Simulink Untuk Implementasi MPPT dengan Metode P&O	74
Gambar 4. 6 Kurva Karakteristik Pada Metode P&O	75
Gambar 4. 7 Flowchart metode <i>perturb and observe</i>	76
Gambar 4. 8 Hasil Simulasi P&O Dengan Perubahan Kecepatan Angin Step	79
Gambar 4. 9 Hasil Simulasi P&O Dengan perubahan Kecepatan Angin Acak	80
Gambar 4.10 Pemodelan Untuk Implementasi MPPT dengan Metode PSO	83
Gambar 4.11 Diagram Alir Algoritma PSO Sebagai MPPT.....	86
Gambar 4.12 Hasil Simulasi PSO Dengan perubahan Kecepatan Angin Step	88
Gambar 4.13 Hasil Simulasi PSO Dengan perubahan Kecepatan Angin Acak	89
Gambar 4.14 Pemodelan Untuk Implementasi MPPT dengan Metode <i>Modified Firefly</i>	93
Gambar 4.15 Diagram Alir Algoritma <i>Modified Firefly</i>	95
Gambar 4.16 Hasil Simulasi <i>Modified Firefly</i> Dengan perubahan Kecepatan Angin Step	97
Gambar 4.17 Hasil Simulasi <i>Modified Firefly</i> Dengan perubahan Kecepatan Angin Acak.....	99
Gambar 4.18 Sistem Konversi Energi Angin <i>Stand alone</i>	100
Gambar 4.19 Kurva Karakteristik Dari Tegangan Keluaran Penyearah Terhadap Kecepatan Generator	103
Gambar 4.20 Diagram Alir <i>Modified P&O</i>	106
Gambar 4.21 Hasil Simulasi Kontroler Fuzzy Dengan perubahan Kecepatan Angin Step	109
Gambar 4.22 Hasil Simulasi Kontroler Fuzzy Dengan perubahan Kecepatan Angin Acak.....	111
Gambar 4.23 Konfigurasi Dasar Sistem Logika Fuzzy	114
Gambar 4.24 Inferensi Fuzzy MAX-Min dengan Masukan Crisp.....	116
Gambar 4.25 Inferensi Fuzzy MAX-DOT dengan Masukan Crisp	116
Gambar 4.26 Pemodelan Untuk Implementasi MPPT dengan Logika Fuzzy	118
Gambar 4.27 Fungsi Keanggotaan Masukan Kontroler MPPT Fuzzy	119

Gambar 4.28 Fungsi Keanggotaan Keluaran Kontroler MPPT Fuzzy	120
Gambar 4.29 Hasil Simulasi Kontroler Fuzzy Dengan perubahan Kecepatan Angin Step	122
Gambar 4.30 Hasil Simulasi Kontroler Fuzzy Dengan perubahan Kecepatan Angin Acak	124
Gambar 4.31 Hasil Simulasi Algoritma P&O, PSO dan <i>Modified Firefly</i> Sebagai MPPT Pada Turbin Angin Terhubung Grid.....	128
Gambar 4.32 Hasil Simulasi Algoritma P&O, PSO dan <i>Modified Firefly</i> Pada Turbin Angin Terhubung Grid Pada Perubahan Kecepatan Angin Acak.....	129
Gambar 5. 1 Blok Diagram Turbin Angin Dengan PMSG Menggunakan Baterai .	136
Gambar 5. 2 Pemodelan Baterai Pada Simulink	139
Gambar 5. 3 Prinsip Kerja Konverter <i>Bidirectional</i>	140
Gambar 5. 4 Kontroler dan pemodelan Konverter <i>Bidirectional</i>	142
Gambar 5. 5 Kontrol <i>Grid Side Converter</i>	143
Gambar 5. 6 Kontroler Arus Sumbu d dan q	145
Gambar 5. 7 Tanggapan Keluaran Arus Sumbu d dan q Terhadap Perubahan Referensi.....	147
Gambar 5. 8 Hasil Simulasi Variasi Kecepatan Angin	148
Gambar 5. 9 Hasil Simulasi Tegangan, Arus dan Daya Keluaran Konverter Pada Kecepatan Angin Berubah.....	148
Gambar 5. 10 Hasil Simulasi Tegangan DC Link Pada Kecepatan Angin Berubah	149
Gambar 5.11 Hasil Simulasi SOC, Tegangan dan Arus Baterai Pada Kecepatan Angin Berubah	150
Gambar 5.12 Hasil Simulasi Respon Daya Aktif Pada Kecepatan Angin Berubah	150
Gambar 5.13 Hasil Simulasi Daya Baterai, Konverter dan Grid Pada Kecepatan Angin Berubah	151
Gambar 5. 14 Hasil Simulasi Profil Kecepatan Angin Acak	152
Gambar 5.15 Hasil Simulasi Daya Keluaran Penyearah Pada Kecepatan Angin Acak.....	153
Gambar 5.16 Hasil Simulasi Respon Tegangan DC Link Pada Kecepatan Angin Acak.....	153
Gambar 5.17 Hasil Simulasi SOC, Arus, dan Tegangan Baterai Pada Kecepatan Angin Acak.....	153
Gambar 5.18 Hasil Simulasi Respon Daya Aktif Pada Kecepatan Angin Acak	154

Gambar 5.19 Hasil Simulasi Daya Baterai, Konverter dan Grid Pada Kecepatan Angin Acak	155
Gambar 5.20 Hasil Simulasi Tegangan, Arus dan Daya Keluaran Penyearah Pada Kondisi Daya Aktif Berubah.....	156
Gambar 5.21 Hasil Simulasi SOC, Arus dan Tegangan Baterai Pada Kondisi Daya Aktif Berubah	157
Gambar 5.22 Hasil Simulasi Respon Daya Aktif Pada Kondisi Daya Aktif Berubah.....	157
Gambar 5.23 Hasil Simulasi Daya Baterai, Konverter dan Grid Pada Kondisi Daya Aktif Berubah	158
Gambar 6. 1 Blok Diagram Peralatan Konversi Energi Angin Skala Kecil	160
Gambar 6. 2 Peralatan Eksperimen Turbin Angin	161
Gambar 6. 3 Hubungan Kecepatan Generator dan Kecepatan Angin.....	163
Gambar 6. 4 Emulator Turbin Angin	163
Gambar 6. 5 Rangkaian Penyearah Dioda 3 Fasa	164
Gambar 6. 6 Rangkaian Penyearah Yang Digunakan Pada Eksperimen	166
Gambar 6. 7 Detektor Arus dan Pengkondisi Sinyal	168
Gambar 6. 8 Rangkaian Detektor Tegangan	168
Gambar 6. 9 Detektor Arus Dan Tegangan.....	170
Gambar 6. 10 Rangkaian Boost Converter	171
Gambar 6. 11 Bentuk Gelombang Boost Converter	171
Gambar 6. 12 Konverter Boost	174
Gambar 6. 13 Tegangan Keluaran PMSG Tanpa beban	175
Gambar 6. 14 Tegangan Keluaran Penyearah Tanpa Filter Kapasitor.....	175
Gambar 6. 15 Tegangan Keluaran Penyearah Dengan filter Kapasitor	176
Gambar 6. 16 Hasil Pengujian Detektor Arus.....	177
Gambar 6. 17 Hasil Pengujian Detektor Tegangan.....	178
Gambar 6. 18 Bentuk Tegangan Keluaran PWM Mikrokontroler dan Tegangan Gate IGBT	179
Gambar 6. 19 Hasil Pengujian Pulsa PWM, Tegangan Keluaran Penyearah dan Tegangan Keluaran Konverter Boost.	180
Gambar 6. 20 <i>Duty Cycle</i> dan Tegangan Keluaran Yang Dihasilkan Untuk Beberapa Tegangan Masukan Pada Konverter Boost	181
Gambar 6. 21 Perbandingan Rasio Pembebanan Terhadap Efisiensi Daya Keluaran Konverter Boost.....	182
Gambar 6. 22 Kurva Karakteristik Daya Penyearah Terhadap Kecepatan Generator	183

Gambar 6. 23 Kurva Karakteristik Daya Penyearah Terhadap Tegangan Penyearah.	184
Gambar 6. 24 Kurva Karakteristik Daya Penyearah Terhadap <i>Duty cycle</i>	185
Gambar 6. 25 Rangkaian Elektronik Pada Sistem Turbin Angin.....	187
Gambar 6. 26 Diagram Alir Pemrograman Mikrokontroler.....	188
Gambar 6. 27 Hasil Pengukuran Tegangan Keluaran Penyearah dan onverter Boost Pada Kecepatan Generator 300 Rpm Dengan Algoritma <i>Modified P&O</i>	190
Gambar 6. 28 Hasil Implementasi Algoritma MPPT Pada Kecepatan Generator 300 Rpm.....	191
Gambar 6. 29 Hasil Pengukuran Tegangan Keluaran Penyearah dan Konverter Boost Pada Kecepatan Generator 400 Rpm Dengan Algoritma <i>Modified P&O</i>	192
Gambar 6. 30 Hasil Implementasi Algoritma MPPT Pada Kecepatan Generator 400 Rpm.....	192
Gambar 6. 31 Hasil Pengukuran Tegangan Keluaran Penyearah dan Konverter Boost Pada Kecepatan Generator 500 Rpm Menggunakan <i>Modified</i> <i>P&O</i>	193
Gambar 6. 32 Hasil Implementasi Algoritma MPPT Pada Kecepatan Angin 7m/s.	194
Gambar 6. 33 Hasil Pengukuran Tegangan Keluaran Penyearah dan Konverter Boost Pada Kecepatan Generator 600 Rpm Menggunakan <i>Modified</i> <i>P&O</i>	195
Gambar 6. 34 Hasil Implementasi Algoritma MPPT Pada Kecepatan Generator 600 Rpm.....	196
Gambar 6. 35 Hasil Pengukuran Tegangan Keluaran Penyearah dan Konverter Boost Pada Kecepatan Angin Berubah	197
Gambar 6. 36 Hasil Implementasi Algoritma <i>Modified P&O</i> Pada Kecepatan Angin Berubah	197

DAFTAR TABEL

Tabel 1. 1 Ringkasan Penelitian Yang Terkait.....	16
Tabel 3. 1 Perbandingan Penelitian.....	43
Tabel 3. 2 Probabilitas Kelas Kecepatan Angin.....	48
Tabel 3. 3 Interpretasi <i>Place</i> dan <i>Transition</i>	49
Tabel 3. 4 Perbandingan Model dan Hasil Pengukuran Kecepatan Angin	51
Tabel 6. 1 Spesifikasi Motor Induksi A-Y3-905.....	162
Tabel 6. 2 Spesifikasi PMSG TD 500 Neidec.....	164
Tabel 6. 3 Spesifikasi perancangan konverter boost.....	172
Tabel 6. 4 Perbandingan Kinerja Konverter Boost Antara Perencanaan dan Pengujian.....	181
Tabel 6. 5 Daya Maksimum Berdasarkan Hasil Pengukuran	184
Tabel 6. 6 Spesifikasi Arduino Mega 2560.....	186
Tabel 6. 7 Perbandingan Kinerja algoritma <i>Modified</i> P&O, Modifief <i>Firefly</i> dan P&O.....	198

DAFTAR ISTILAH

P_{pn}	= Himpunan <i>place</i> pada petri nets
T_{pn}	= Himpunan <i>transition</i> pada petri nets
I_{pn}	= Matrix masukan yang menunjukkan arah dari <i>place</i> ke <i>transition</i>
O_{pn}	= Matrix masukan yang menunjukkan arah dari <i>transition</i> ke <i>place</i>
M_o	= <i>initial marking</i>
P_i	= Probabilitas untuk setiap kelas
N_s	= Jumlah kejadian kecepatan angin dalam kelas tertentu
N_T	= Jumlah total kejadian kecepatan angin
M_K	= matrik <i>incident</i>
P_m	= Daya mekanik turbin angin (w)
ρ	= kerapatan udara (Kg/m^3)
A	= Luasan blade (m^2)
v	= Kecepatan angin (m/s)
C_p	= Koefisien konversi daya
R	= Radius turbin (m)
λ	= <i>Tip Speed Ratio</i>
β	= <i>Pitch angle</i> (°)
ω_r	= Kecepatan rotor (rad/s)
ω_{r_opt}	= Kecepatan rotor optimal (rad/s)
T_m	= Torsi elektromagnetik generator (Nm)
J	= momen inersia (Kgm^2)
F	= Koefisien gesek (Nms)
v_{ds}	= Tegangan stator sumbu d (V)
v_{qs}	= Tegangan stator sumbu q (V)
i_{ds}	= Arus stator sumbu d (A)
i_{qs}	= Arus stator sumbu q (A)
$L_{d,q}$	= induktansi belitan sumbu d dan q (H)
λ_{qs}	= Flux stator sumbu q (Vs)
λ_{ds}	= Flux stator sumbu d (Vs)
λ_r	= Flux rotor (Vs)
p	= Jumlah pasangan pole
V_{dc}	= Tegangan keluaran penyearah (V)
I_{dc}	= Arus keluaran penyearah (A)
P_{dc}	= Daya keluaran penyearah (w)
V_{ph}	= Tegangan keluaran per fasa untuk PMSG (V)
E_g	= Daya elektromotif PMSG

I_g	= Arus fasa PMSG (A)
R_s	= Resistansi stator (Ω)
D	= <i>Duty cycle</i>
T_{on}	= Waktu pulsa on (s)
T_s	= Periode <i>switching</i> (s)
V_{out}	= Tegangan keluaran konverter boost (V)
P_{out}	= Daya keluaran konverter boost (w)
I_o	= Arus keluaran konverter boost (A)
R_L	= Resistansi beban (Ω)
P_{in}	= Daya masukan konverter boost (w)
R_{in}	= Resistansi masukan konverter boost (Ω)
v_{di}	= Tegangan stator sumbu d pada inverter (V)
v_{qi}	= Tegangan stator sumbu q pada inverter (V)
i_{di}	= Arus stator sumbu d pada inverter (A)
i_{qi}	= Arus stator sumbu q pada inverter (A)
v_{dg}	= Tegangan stator sumbu d pada grid (V)
v_{qg}	= Tegangan stator sumbu q pada grid (V)
i_{dg}	= Arus stator sumbu d pada grid (A)
i_{qg}	= Arus stator sumbu q pada grid (A)
$C1, C2$	= Konstanta akselerasi pada PSO
V_i	= Kecepatan partikel pada PSO
d_i	= Posisi partikel pada PSO
d_{pbesti}	= Posisi terbaik untuk setiap partikel pada PSO
d_{gbesti}	= Posisi terbaik untuk setiap kelompok pada PSO
r_1, r_2	= Nilai random pada PSO
I_o	= Intensitas cahaya awal kunang-kunang
γ	= Koefisien penyerapan cahaya kunang-kunang
$r_{i,j}$	= Jarak antara dua kunang-kunang
β_m	= Ketertarikan kunang-kunang
β_0	= Ketertarikan awal kunang-kunang pada jarak 0
α	= Konstanta algoritma firefly
α_t	= Konstanta termodifikasi pada algoritma <i>modified</i> firefly
ε_i	= nilai vector acak
V_{out}	= Tegangan keluaran konverter boost (V)
V_{bat}	= Tegangan sesaat baterai (V)
i_{bat}	= Arus sesaat baterai (V)
E_{bat}	= Tegangan baterai tanpa beban (V)
R_i	= Tahanan internal baterai (Ω)

K_p = Konstanta proposional
 K_i = Konstanta integrator
 K_d = Konstanta differensiator
 $V_{m_{L-L}}$ = Tegangan maksimum *line to line* (V)
 V_L = Tegangan keluaran rms penyearah (V)
 C = Kapasitansi (Farad)
 V_{ripple} = Tegangan ripple penyearah (V)
 V_s = Tegangan masukan konverter boost (V)
 f = Frekuensi (Hz)
 V_f = Tegangan forward dioda (V)
 ΔV_{out} = Tegangan ripple konverter boost (V)
 I_L = Arus Induktor (A)

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Saat ini kebutuhan energi listrik semakin meningkat sebanding dengan pertumbuhan penduduk dengan rata-rata pertumbuhan sekitar 1,34% pada tahun 2015. Konsumsi listrik dalam kurun waktu tahun 2000-2014 mengalami pertumbuhan rata-rata 6,8% per tahun dengan rasio elektrifikasi nasional sebesar 84,4% pada tahun 2014, dimana mengalami peningkatan 3,9% dari tahun 2013[1]. Terdapat 16,6% penduduk Indonesia belum dialiri listrik. Pada tahun 2012, bahan bakar pembangkit nasional menggunakan bahan bakar fosil lebih dari 90%. Penggunaan energi fosil sebagai bahan bakar pembangkit listrik dapat menghasilkan emisi CO₂ sebesar 500g CO₂/kWh hingga 1200g CO₂/kWh[2]. Di Indonesia pada tahun 2012 menghasilkan emisi gas rumah kaca sebesar 540 juta ton CO₂ dengan pertumbuhan rata-rata sebesar 5,5%. Penghasil emisi gas rumah kaca terbesar adalah pembangkit listrik dari 177 juta ton CO₂ [1]. Namun ketersediaan energi fosil yang digunakan selama ini semakin menipis, dimana cadangan batubara hanya dapat dimanfaatkan hingga 75 tahun, gas dapat dimanfaatkan hingga 33 tahun dan minyak memiliki potensi terkecil hanya dapat dimanfaatkan 12 tahun [1]. Kondisi ini menyebabkan krisis energi di Indonesia sehingga diperlukan diversifikasi energi untuk menjamin ketersediaan energi. Hal ini sejalan dengan Undang-Undang No.30 Tahun 2007 tentang energi yang menyatakan salah satu cara penyediaan energi dilakukan melalui diversifikasi energi dan meningkatkan penyediaan energi baru dan terbarukan. Diversifikasi energi dapat dilakukan dengan mencari energi alternatif yang dapat menggantikan penggunaan energi fosil.

Indonesia memiliki potensi energi terbarukan seperti tenaga air, panas bumi, angin, surya, samudera, maupun biomasa yang cukup besar. Berdasarkan beberapa sumber energi terbarukan, energi angin mengalami perkembangan yang cukup cepat [3]. Berdasarkan Global Wind Energy Outlook [2], pada akhir 2015, total kapasitas

energi angin yang telah diinstal di lebih dari 90 negara sebesar 432,9 GW dengan rata-rata pertumbuhan sekitar 17%. Berdasarkan kementerian ESDM RI [4], sumberdaya energi angin di berbagai wilayah Indonesia berkisar antara 2,5 – 5,5 m/detik pada ketinggian 24 meter di atas permukaan tanah. Dengan kecepatan tersebut sumberdaya energi angin Indonesia termasuk dalam kategori kecepatan angin kelas rendah hingga menengah. Secara keseluruhan, potensi energi angin Indonesia diperkirakan mencapai 970 MW dan baru dimanfaatkan sekitar 1,96MW [1]. sehingga prospek pengembangan teknologi PLTB masih sangat tinggi.

Penggunaan energi angin sebagai energi alternatif memiliki keuntungan yaitu ramah lingkungan, bebas polusi emisi CO₂, sumber daya yang tidak terbatas, handal dan mudah didapatkan [3][5]. Pemanfaatan energi angin menjadi energi listrik membutuhkan turbin angin dan generator listrik. Turbin angin beroperasi didalam dua mode yaitu kecepatan konstan (*constant speed*) atau kecepatan berubah (*variable speed*). Keuntungan turbin mode kecepatan konstan yaitu mengurangi rangkaian elektronika daya yang mahal seperti inverter dan konverter. Sedangkan kerugian yang dimiliki mode ini yaitu dengan kecepatan rotor yang konstan maka turbin tidak dapat beroperasi pada efisiensi puncak sehingga menghasilkan energi yang lebih kecil dibandingkan mode kecepatan berubah [6][7]. Sedangkan turbin dengan kecepatan berubah didesain untuk beroperasi dimana kecepatan rotor sebanding dengan kecepatan angin. Sehingga turbin jenis *variable speed* lebih efektif dibandingkan *constan speed* karena dapat mengoptimumkan konversi energi angin [8]. Turbin angin dengan kecepatan berubah didesain untuk mencapai efisiensi aerodinamik maksimum dengan jangkauan kecepatan angin yang lebar sehingga meningkatkan energi yang ditangkap, meningkatkan kualitas daya dan mengurangi rugi mekanik pada turbin angin [9].

Untuk mengubah energi mekanik menjadi energi listrik diperlukan generator listrik. Didalam sistem konversi energi angin terdapat beberapa generator listrik yang dapat digunakan antara lain generator sinkron, generator induksi rotor sangkar, double fed induction generator, dan permanent magnet synchronous

generator(PMSG) [10]. Saat ini PMSG merupakan salah satu generator sinkron yang paling banyak digunakan pada aplikasi sistem VSWT karena memiliki beberapa keuntungan yaitu (1) tidak memerlukan sistem eksitasi eksternal, tidak terdapat rugi-rugi tembaga pada rangkaian rotor, biaya perawatan rendah dan kerapatan daya tinggi [11], (2) reliabilitas yang lebih baik, membutuhkan perawatan yang tidak rumit, ringan, volume rendah, performansi tinggi [12], (3) tidak membutuhkan gearbox sehingga dapat beroperasi pada kecepatan rendah dan mengurangi rugi-rugi, berat, dan biaya perawatan, (4) efisiensi tinggi [13], (5) Jika terdapat gangguan pada grid tidak berpengaruh secara langsung pada generator, (5) amplitudo dan frekuensi tegangan generator dapat dikontrol penuh oleh konverter [14]. Penggunaan PMSG pada turbin angin jenis variable speed akan lebih efektif dengan mengoptimalkan efisiensi sistem [15].

Sistem konversi energi angin (SKEA) sangat dipengaruhi oleh kecepatan angin yang selalu bervariasi. Perubahan kecepatan angin akan mempengaruhi daya keluaran yang dihasilkan. Untuk itu dibutuhkan pemodelan dan prediksi kecepatan angin yang akurat untuk membantu optimalisasi desain turbin dan sistem kontrol pada SKEA serta mempertahankan kestabilan sistem [16] [17]. Selain itu pemodelan kecepatan angin diperlukan untuk mengevaluasi daya yang dihasilkan oleh turbin angin dan menginvestigasi load matching dan kebutuhan penyimpanan pada SKEA [18]. Beberapa metode telah dikembangkan untuk prediksi dan pemodelan kecepatan angin. Metode prediksi kecepatan angin dibagi menjadi dua kategori yaitu metode secara fisik dan metode secara statistik. Metode fisik menggunakan pendekatan secara fisik untuk mendapatkan hasil prediksi terbaik. Metode ini memberikan hasil terbaik untuk prediksi jangka panjang. Sedangkan metode statistik menggunakan hubungan secara on-line pada hasil pengukuran. Metode ini sesuai untuk prediksi jangka pendek. Model statistik identik dengan random time-series model, antara lain dengan menggunakan metode autoregressive (AR) dan Autoregressive moving average (ARMA) [19]. Beberapa metode lain juga telah dikembangkan untuk pemodelan kecepatan angin dengan menggunakan neural network [20] [21]. Model

statistik kecepatan angin dapat dihasilkan dengan menggunakan markov process menghasilkan model dengan nilai statistik yang sama dengan nilai kecepatan angin hasil pengukuran [16] [18].

Dengan menggunakan pemodelan angin dapat didesain kontrol sistem konversi energi angin (SKEA) yang sesuai karena pada kecepatan angin tertentu akan menghasilkan daya listrik tertentu pula. Kelemahan pemanfaatan energi angin yaitu kecepatan angin yang berfluktuasi dengan cepat dan tidak dapat dikontrol [22][3][23] sehingga akan menghasilkan daya yang berfluktuasi pula yang menyebabkan kualitas daya yang dikirim ke beban menjadi rendah. Namun, Beban yang terhubung dengan sistem konversi energi angin mungkin hanya membutuhkan daya yang lebih rendah dari daya maksimal yang dapat dihasilkan oleh turbin angin atau sebaliknya. Hal ini dapat diatasi dengan menggunakan metode penyimpanan energi untuk menyimpan energi ketika kebutuhan daya beban kurang dari daya yang diberikan oleh angin [7]. Untuk itu diperlukan kontrol optimal untuk dapat mengekstrak daya maksimum dari variasi kecepatan angin sehingga efisiensi SKEA. Beberapa metode telah dikembangkan untuk kontrol *maximum power point tracking* (MPPT) antara lain metode tip speed ratio (TSR) optimum, power feedback control, perturb&observe, logika fuzzy, neural network dan algoritma *swarm intelligent* [6][24][25][26][27] . Penggunaan MPPT dapat menghasilkan daya keluaran mekanis maksimum pada setiap kecepatan angin yang berbeda namun daya keluaran dari PMSG ini juga akan selalu berfluktuasi mengikuti perubahan kecepatan angin karena daya angin sebanding dengan kecepatan angin. Daya angin yang berfluktuasi akan menyebabkan frekuensi grid berfluktuasi yang mengakibatkan kuantitas daya yang dikirim menjadi rendah dan menghasilkan ketidakstabilan pada sistem daya [3][22][28].

Untuk mengurangi fluktuasi daya yang disebabkan sumber energi angin yang tidak dapat diprediksi dan tidak menentu, dapat digunakan melalui pengaturan *pitch angle* untuk mendapatkan daya konstan. Pengaturan *pitch angle* menggunakan adaptive neural network dapat menghaluskan daya keluaran yang dikirim ke grid [29]. Bansal [30] juga menggunakan pengaturan *pitch angle* dengan menggunakan

kontroler PI dan neural network untuk sistem SKEA dengan PMSG yang terhubung ke grid. *Pitch angle* diatur untuk mendapatkan daya yang sesuai dengan dibutuhkan. Viveiros [31] menggunakan kontroler fuzzy PI mengatur untuk mempertahankan daya yang dihasilkan pada daya rata-rata melalui pengaturan pitch angle. Penggunaan kontroler fuzzy PI menghasilkan respon yang lebih halus dengan variasi pitch angle yang lebih besar. Kelemahan topologi ini meningkatkan stress mekanik pada blade dan meningkatkan biaya peralatan.

Metode lain yang digunakan untuk mengurangi fluktuasi daya dan mempertahankan daya konstan dengan menggunakan baterai sebagai penyimpan energi yang terhubung ke dc-link menggunakan konverter dc-dc [32][33][34]. Kontrol optimal dibutuhkan untuk menghaluskan daya keluaran dan mendapatkan daya konstan yang sesuai dengan kebutuhan. Baterai sebagai penyimpan energi membantu untuk mempertahankan keseimbangan daya selama kondisi pembangkitan berlebih atau kurang dan perubahan beban. Keuntungan topologi ini yaitu ekstraksi daya maksimum dan keseimbangan daya dapat direalisasikan dengan mengintegrasikan sistem penyimpanan energi tanpa menyebabkan stress mekanik. Namun kelemahan dari topologi ini membutuhkan tambahan konverter dan kontrol untuk mempertahankan tegangan dc link selama perubahan beban [32]. Hui [7] melakukan kontrol SKEA menggunakan logika fuzzy untuk MPPT. Skema manajemen daya dapat menentukan secara akurat berapa banyak daya yang dibutuhkan beban dengan meningkatkan efisiensi daya SKEA. Namun pengaturan daya dilakukan berdasarkan data daya generator, daya beban dan tegangan pada baterai.

Pada penelitian ini akan didesain kontrol optimal pada sistem konversi energi angin menggunakan PMSG untuk mengatur aliran daya yang dihasilkan turbin angin ke beban dengan menggunakan baterai sebagai penyimpan energi berdasarkan hasil pengukuran kecepatan angin di Kabupaten Nganjuk. SKEA akan menghasilkan daya optimal melalui ekstraksi daya maksimum menggunakan metode MPPT berdasarkan *swarm intelligence*. Beberapa metode MPPT yang terdiri dari metode konvensional,

artificial intelligence dan *swarm intelligence* dikembangkan untuk dapat diimplementasikan pada SKEA dan performansi antara metode tersebut akan dibandingkan. Sedangkan untuk menghasilkan daya konstan menggunakan baterai sebagai penyimpan energi dan kontroler pada *grid side converter* (GSC). Baterai terhubung pada tegangan DC-link melalui konverter *bidirectional* yang dikontrol oleh kontroler PI. Kontroler pada konverter *bidirectional* akan mempertahankan tegangan DC link melalui pengaturan pengisian dan pengosongan baterai. Sedangkan kontroler GSC akan mengatur kebutuhan daya yang sesuai dengan grid melalui pengaturan *duty cycle* PWM inverter. Metode MPPT dengan algoritma sederhana dan performansi yang baik akan diimplementasikan dalam perangkat keras menggunakan mikrokontroler dan prototipe SKEA.

1.2 Perumusan Masalah

Karakteristik kecepatan angin yang tidak menentu akan menghasilkan daya listrik yang berfluktuasi sehingga akan menurunkan kuantitas daya yang dikirim ke beban. Untuk menghasilkan daya konstan pada beban maka diperlukan pengaturan daya pada beban yang dapat dilakukan dengan menggunakan penyimpanan energi dan tanpa penyimpanan energi. Sistem kontrol optimal pada sistem konversi energi angin (SKEA) dengan menggunakan baterai sebagai sistem penyimpan energi telah dikembangkan pada disertasi ini untuk mengontrol aliran daya ke beban. Berdasarkan kurva kecepatan angin dan daya yang dihasilkan, daerah operasi sistem konversi energi angin dapat terbagi menjadi empat yaitu daerah dibawah kecepatan angin *cut-in*, daerah diantara kecepatan angin *cut-in* dan kecepatan angin rata-rata, daerah antara kecepatan angin rata-rata dan kecepatan angin *cut off* dan daerah di atas kecepatan angin *cut off*. Pada daerah dibawah kecepatan angin *cut in*, turbin angin belum dapat menghasilkan daya listrik, sedangkan daerah dimana kecepatan angin diantara kecepatan angin *cut-in* dan kecepatan angin rata-rata, turbin angin telah menghasilkan energi listrik yang besarnya tergantung pada kecepatan angin. Untuk mendapatkan daya optimal yang ditangkap oleh turbin angin pada setiap perubahan

kecepatan angin, maka dibutuhkan *maximum power point tracking* (MPPT). Jika kecepatan angin diatas kecepatan angin rata-rata dan kecepatan angin *cut off* maka SKEA harus dikontrol untuk menghasilkan daya rata-rata. Pada kecepatan angin diatas kecepatan *cut off* maka SKEA harus dihentikan untuk menghindari kerusakan mekanik pada sistem. Berdasarkan hal tersebut maka dapat dirumuskan

1. Bagaimana pemodelan sistem konversi energi angin menggunakan permanent magnet synchronous generator (PMSG)?
2. Bagaimana desain *maximum power point tracking* (MPPT) untuk mengoptimasi daya maksimum yang dapat ditangkap SKEA tanpa menggunakan sensor kecepatan angin dan kecepatan turbin ?
3. Bagaimana mengimplementasikan algoritma MPPT pada prototype SKEA *stand-alone* skala laboratorium dengan menggunakan mikrokontroller ?
4. Bagaimana desain strategi kontrol optimal pada SKEA dengan menggunakan baterai sebagai penyimpan energi untuk mengatur aliran daya ke beban?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan permasalahan yang telah diuraikan diatas, maka tujuan yang ingin dicapai pada penelitian ini yaitu :

1. Mendapatkan pemodelan sistem konversi energi angin (SKEA) dengan menggunakan permanent magnet synchronous generator (PMSG) berdasarkan peralatan yang digunakan untuk *standalone* maupun sistem yang terhubung ke grid. Pemodelan ini digunakan untuk pengembangan strategi kontrol SKEA sebelum diimplementasikan pada perangkat keras.
2. Menentukan strategi kontrol MPPT untuk meningkatkan efisiensi ekstraksi daya maksimum terhadap fluktuasi perubahan angin pada SKEA tanpa menggunakan sensor kecepatan angin dan mekanik. MPPT didesain berdasarkan arus dan tegangan keluaran rangkaian konverter daya untuk mendapatkan titik daya maksimum melalui pengaturan rangkaian konverter daya sehingga turbin angin bekerja pada kecepatan optimal.

3. Mendesain prototipe sistem konversi energi angin dengan PMSG 500 Watt skala laboratorium. Prototipe SKEA dilengkapi dengan algoritma MPPT dan diimplementasikan pada mikrokontroler sehingga didapatkan SKEA dengan konfigurasi yang sederhana dan mudah diimplementasikan.
4. Mengembangkan strategi kontrol optimal pada SKEA untuk mengatur aliran daya konstan pada beban walaupun terjadi fluktuasi kecepatan angin dengan menggunakan baterai sebagai penyimpan energi. Strategi kontrol optimal disusun berdasarkan karakteristik kurva kecepatan angin dan daya turbin angin sehingga didapatkan daya konstan pada beban melalui pengaturan pengisian dan pengosongan baterai.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini yaitu didapatnya strategi kontrol optimal untuk SKEA dengan PMSG dengan memanfaatkan baterai sebagai penyimpan energi. Strategi kontrol akan mengatur aliran daya ke beban dengan memaksimalkan daya keluaran turbin angin melalui MPPT sehingga daya yang terkirim ke beban sesuai dengan kebutuhan dan dapat menentukan secara akurat berapa banyak daya yang dibutuhkan beban dengan meningkatkan efisiensi daya sistem. Selain itu manfaat lain dari penelitian ini adalah didapatkannya model sistem konversi energi angin dengan kontrol optimal yang dapat digunakan dalam pengembangan kontrol SKEA.

1.5 Kontribusi dan Kebaharuan Penelitian

Kontribusi dan kebaruan yang diharapkan dari penelitian ini adalah :

1. Terkait dengan pemodelan sistem konversi energi angin dengan PMSG berdasarkan peralatan yang digunakan dan pemodelan kecepatan angin berdasarkan hasil pengukuran kecepatan angin di Nganjuk menggunakan stokastik petri net.
2. Terkait dengan sistem kontrol MPPT pada SKEA dengan PMSG yang telah dikembangkan berdasarkan variable elektrik dari sistem dan tanpa menggunakan sensor kecepatan dan mekanik, sehingga mengurangi biaya

sistem, lebih sederhana, efisien dan mudah diimplementasikan. Pada penelitian ini telah dilakukan investigasi terhadap penerapan kecerdasan buatan pada algoritma MPPT dan telah menghasilkan algoritma yang sederhana, efektif dan robust terhadap fluktuasi perubahan angin.

3. Terkait dengan strategi kontrol optimal pada SKEA dengan PMSG untuk mengatur aliran daya ke beban sehingga menghasilkan daya konstan terhadap fluktuasi kecepatan angin yang sesuai dengan kebutuhan beban. Kontrol optimal dikembangkan dengan menggunakan baterai sebagai penyimpanan energi dan melalui pengaturan tegangan DC link yang dipertahankan konstan. Daya yang dikirim ke beban dipertahankan konstan sesuai kebutuhan beban melalui pengaturan pada pengisian dan pengosongan baterai.

1.6 Posisi dan Roadmap Penelitian

1.6.1 Penelitian Sebelumnya

Beberapa penelitian yang terkait dengan sistem konversi energi angin dengan menggunakan PMSG telah dilakukan oleh beberapa peneliti. Nasiri dkk [3] membandingkan dua metode yaitu *tip speed ratio* (TSR) dan *optimal torque control* (OTC) untuk MPPT dan menghasilkan *power smoothing* menggunakan pemodelan sinyal kecil dari PMSG. Berdasarkan hasil simulasi, metode TSR menghasilkan respon sistem dengan *undershoot* dan tidak dapat memberikan daya keluaran yang halus walaupun memiliki respon yang cepat terhadap variasi kecepatan angin. Sedangkan metode OTC memiliki respon transien yang lambat namun memiliki daya keluaran yang halus dan tidak membutuhkan peralatan tambahan untuk meningkatkan performansi daya generator. Selain itu metode OTC dapat mengekstrak titik daya maksimum dengan kondisi kecepatan angin yang bervariasi. Zou Yu dan He Jiangbiao [14] melakukan investigasi untuk pemodelan, simulasi dan implementasi sistem turbin angin menggunakan PMSG. Skema kontrol yang didesain telah diverifikasi melalui simulasi dengan MATLAB versi 2013 dan diuji secara eksperimen untuk mengatur daya dan kecepatan pada sistem daya angin. Selain itu

Abdullah dkk [35] juga menganalisis beberapa algoritma MPPT untuk sistem energi angin. Algoritma MPPT dapat diklasifikasikan menjadi dua yaitu dengan sensor dan tanpa sensor berdasarkan teknik yang digunakan untuk menentukan lokasi puncak maksimum. Beberapa metode MPPT yang sering digunakan dibandingkan berdasarkan respon kecepatan dan kemampuan untuk mencapai energi maksimum. Berdasarkan hasil simulasi, metode *optimal torque control* (OTC) merupakan metode terbaik untuk sistem energi angin karena sederhana. Sedangkan metode perturbation & observation (P&O) merupakan metode yang fleksibel dan mudah diimplementasikan tetapi kurang efisien dan sulit untuk menentukan ukuran perubahan yang optimum. Aissaoui dkk [36] mengembangkan model sistem konversi energi angin berdasarkan permanent magnet synchronous generator (PMSG). Kontrol adaptif fuzzy PI digunakan untuk mengatur kecepatan PMSG sehingga turbin dapat beroperasi pada daya optimal yang akan dikirim ke beban. Penggunaan kontroler fuzzy PI memberikan performansi yang terbaik dibandingkan dengan kontroler PI.

Cheng Ming & Zhu Yu [6] melakukan review komprehensif mengenai teknologi sistem konversi energi angin. Sistem konversi energi angin dapat terbagi menjadi beberapa tipe yang dibagi menjadi beberapa kelas berdasarkan konverter daya yang digunakan dan dibandingkan berdasarkan volume, berat, biaya, efisiensi, kehandalan sistem dan kapasitas. Turbin angin kecepatan berubah dengan PMSG dan konverter skala penuh merupakan teknologi yang paling populer dan lebih atraktif. Penggunaan metode MPPT untuk mendapatkan daya optimal diperlukan dan beberapa metode MPPT yang telah banyak diteliti dibandingkan berdasarkan kebutuhan karakteristik turbin angin, data kecepatan angin dan rotor, kecepatan pencarian, kompleksitas algoritma dan performansi terhadap perubahan kecepatan angin. Review mengenai algoritma untuk mengekstraksi daya maksimum pada turbin angin juga dilakukan oleh Ram Prasanth dkk [37] dengan membandingkan beberapa metode yang telah banyak digunakan. Algoritma P&O merupakan algoritma yang paling sederhana, tidak membutuhkan memori namun kurang dapat mengikuti

perubahan kecepatan angin yang cepat. Penggunaan kecerdasan buatan, seperti logika fuzzy dan neural network sebagai algoritma untuk mengekstrak daya maksimum dapat meningkatkan performansi terhadap perubahan kecepatan angin namun memiliki kompleksitas algoritma yang tinggi dan membutuhkan memori yang besar. Chen Jiawei dkk [13] juga mengembangkan algoritma *maximum power point tracking* (MPPT) dengan mengkombinasikan antara metode P&O termodifikasi dan *power signal feedback* (PSF), dimana metode P&O termodifikasi digunakan untuk mencari titik daya maksimum yang selanjutnya akan diteruskan oleh metode PSF untuk mempertahankan titik daya maksimum tersebut. Penggunaan metode ini dapat menghindari kebutuhan mengenai karakteristik aerodinamik turbin dan riak daya dapat dikurangi. Metode yang didesain diverifikasi melalui eksperimen.

Penggunaan MPPT pada kondisi angin yang berfluktuasi akan menghasilkan daya yang berfluktuasi pula, sehingga dibutuhkan kontrol untuk menghaluskan daya keluaran yang dihasilkan. Izumi dkk [38] mengembangkan metode *output power smoothing* (OPS) menggunakan logika fuzzy dan prediksi kecepatan angin jangka pendek. Sistem konversi energi angin menggunakan PMSG, dimana untuk mendapatkan daya maksimal maka kecepatan rotasi PMSG diatur menggunakan logika fuzzy berdasarkan hasil prediksi kecepatan angin dan perbedaan antara torsi turbin angin dan torsi generator. Prediksi kecepatan angin menggunakan metode least square. Konverter daya mengatur torsi generator berdasarkan torsi referensi melalui pengaturan PWM. Torsi generator referensi ditentukan menggunakan logika fuzzy. Jika kecepatan angin meningkat maka selisih antara torsi turbin dan generator akan lebih besar dari nol sehingga kecepatan generator harus meningkat. Berdasarkan hasil simulasi torsi generator dapat dihaluskan. Hui Joanne dkk [7] mengembangkan teknik manajemen daya untuk sistem konversi energi angin dengan PMSG dan *maximum power point tracking* (MPPT) dengan menggunakan elemen penyimpan energi berupa baterai. Dua tingkat konverter digunakan untuk mengisi baterai dan untuk melepaskan daya ke *dump load* ketika terdapat kelebihan energi pada baterai dan beban. Algoritma kontrol MPPT menggunakan kontrol logika

fuzzy. Skema manajemen daya pada sistem konversi energi angin disusun berdasarkan daya keluaran generator, daya link-DC dan daya beban sehingga dapat mengirim daya maksimum dari angin dan mengatur daya dari angin ketika daya yang dibutuhkan beban lebih rendah dari daya maksimum. Berdasarkan hasil simulasi, kecepatan generator dapat mengikuti kecepatan referensi yang dihasilkan oleh MPPT dan daya maksimum dapat dicapai pada setiap kecepatan angin tertentu.

Sarrias dkk [33] mengembangkan sistem kontrol untuk menghaluskan daya keluaran dengan menggunakan baterai untuk turbin angin menggunakan DFIG. Penggunaan baterai dapat menghaluskan fluktuasi daya yang disebabkan oleh daya angin yang tidak menentu dan tidak dapat diprediksi. Sistem kontrol supervisi dikembangkan untuk manajemen energi menggunakan *state machine*. Kontrol supervisi menentukan daya referensi yang disimpan dalam baterai berdasarkan *state of charge* (SOC) baterai dan perbedaan daya antara daya yang dihasilkan DFIG dan daya yang dibutuhkan oleh grid. Berdasarkan hasil simulasi, kontrol supervisor dapat mengatur baterai untuk menyimpan atau mengirim energi sesuai dengan kebutuhan, pengaturan tegangan bus DC dan mensuplai daya yang dibutuhkan grid ketika dibutuhkan.

Howlader dkk [22] mereview dan menganalisis beberapa strategi penghalusan daya untuk sistem konversi energi angin. Metode penghalusan daya dibagi menjadi dua kategori yaitu menggunakan peralatan penyimpanan energi seperti ultra kapasitor, baterai, flywheel dan fuel cell dan tanpa menggunakan peralatan penyimpanan energi. Metode penghalusan daya tanpa menggunakan peralatan penyimpanan terdiri dari pengaturan energi kinetik, pengaturan *pitch angle*, dan pengaturan tegangan DC-link. Metode dengan penyimpanan energi sangat efektif namun meningkatkan biaya instalasi dan perawatan. Sedangkan metode tanpa penyimpanan energi dapat mengurangi biaya secara signifikan. Beberapa metode yang telah direview, metode dengan pengaturan energi kinetik merupakan metode penghalusan daya (*power smoothing*) yang paling efektif. Penggunaan kontrol *pitch angle* untuk menghaluskan daya keluaran juga telah diteliti oleh Garasi dkk [39].

Penelitian ini mengembangkan metode pengaturan *pitch angle* menggunakan logika fuzzy dan kontroler PI. Kontrol *pitch angle* pada turbin angin mempertahankan daya keluaran dalam nilai rata-rata dengan menaikkan nilai *pitch angle* turbin angin untuk menghindari kerusakan pada bagian mekanik turbin bila terjadi kecepatan angin yang tinggi. Logika fuzzy dihubungkan dengan kontroler PI untuk menala penguatan proposional dan integral. Dibandingkan dengan kontroler PI, kontroler fuzzy-PI menghasilkan jangkauan perubahan *pitch angle* yang lebih besar sehingga menghasilkan fluktuasi kecepatan yang lebih kecil. Namun metode ini meningkatkan stress mekanik pada turbin.

Sarrias-Mena dkk [40] mengembangkan sistem kontrol menggunakan logika fuzzy untuk mengatur referensi daya aktif dan reaktif untuk setiap komponen sistem. Sistem terdiri dari DFIG, baterai dan ultrakapasitor. Sistem hibrid turbin angin dengan dua elemen penyimpan energi dioperasikan dengan kondisi operasi yang berbeda, kecepatan angin dan kebutuhan grid yang bervariasi dan gangguan pada grid. Tiga strategi kontrol yang berbeda dibandingkan yaitu sistem kontrol supervisory (SKS) dengan kontroler logika fuzzy, SKS dengan struktur yang sama dengan yang pertama namun tanpa kontroler logika fuzzy dan SKS berdasarkan kontrol state machine. Hasil simulasi menunjukkan SKS dengan kontroler logika fuzzy menghasilkan pengaturan energi yang lebih baik. Selain itu performansi daya reaktif yang dihasilkan meningkat walaupun terjadi gangguan pada grid. Demikian pula dengan viveiros dkk [31] mengembangkan kontrol hirarki pada *variable speed wind turbine* dengan menggunakan DFIG. Arsitektur kontrol hirarki diimplementasikan untuk mencapai performansi sistem yang baik sehingga dapat mengirimkan energi ke jaringan listrik. Kontrol hirarki terdiri dari level supervisi yang berdasarkan *event-based supervisor* dan level eksekusi yang menggunakan kontroler fuzzy proposional integral dan *discrete adaptive linier quadratic*. Kontrol hirarki didesain berdasarkan kondisi kecepatan angin dan kurva daya turbin angin melalui pengaturan *pitch angle* yang dilakukan oleh kontroler pada level eksekusi. Kontrol supervisor menentukan kondisi operasional berdasarkan data dari kecepatan

angin dan generator. Berdasarkan hasil simulasi kontroler fuzzy PI menghasilkan respon yang lebih halus dengan variasi *pitch angle* yang lebih besar dibandingkan kontroler LQ. Dengan variasi *pitch angle* yang cukup besar akan mengakibatkan stress mekanik yang cukup besar pada turbin.

Carranza dkk [41] menganalisis dua struktur kontrol untuk sistem pembangkit energi angin dengan PMSG yaitu kontrol kecepatan dan kontrol torsi. PMSG selalu dihubungkan dengan konverter AC/DC karena tegangan dan frekuensi keluaran tergantung pada kecepatan angin. Berdasarkan hasil simulasi kontrol kecepatan merupakan skema kontrol yang paling baik diimplementasikan karena menghasilkan sistem yang stabil dan mudah diimplementasikan menggunakan algoritma kontrol konvensional seperti kontroler PI. Sebaliknya kontrol torsi sangat sulit untuk menghasilkan sistem yang stabil. Turbin angin skala kecil *stand alone* lebih sesuai untuk implementasi energi angin pada daerah terpencil yang tidak terjangkau oleh grid. Beberapa faktor yang harus dipertimbangkan yaitu efisiensi dan biaya ekonomis, untuk itu diperlukan strategi kontrol yang dapat menghasilkan efisiensi tinggi. Satpathy dkk [42] mengembangkan kontrol aliran daya ke beban DC menggunakan MPPT, kontrol *charge* dan *discharge* baterai dan kontrol *pitch angle*. Sistem hibrid turbin angin dan baterai dipilih untuk mensuplai daya beban yang dibutuhkan. Kontroler meliputi kontrol pengisian baterai melalui MPPT dan kontrol *pitch*. Kontroler pengisian baterai akan mencari daya maksimum yang tersedia untuk pengisian baterai dengan menggunakan buck konverter. Namun selama daya tidak sesuai dengan kondisi, kontrol *pitch* akan mengatur *pitch angle* untuk mengurangi daya keluaran turbin angin. Skema kontrol *pitch* menggunakan kontroler proposional integrator (PI) berdasarkan kecepatan rotasi turbin, daya dan tegangan keluaran penyearah. Bertasiene & Azzopardi [43] menganalisis dan mengidentifikasi strategi kontrol untuk turbin angin skala kecil untuk meningkatkan efisiensi daya, kualitas dan kestabilan sistem. Beberapa teknik telah digunakan untuk kontrol turbin angin antara lain logika fuzzy yang menghasilkan performansi yang baik untuk pengaturan daya keluaran dan kecepatan rotor, algoritma genetika yang dapat meningkatkan daya

keluaran dan mengoptimasi struktur, lokasi dan biaya, neural network yang diaplikasikan pada prediksi dan kontrol untuk memprediksi kecepatan angin, kestabilan sistem dan daya yang diinginkan dengan kecepatan angin yang berubah dan algoritma adaptif dan intelligent yang diaplikasikan untuk kontrol, optimasi dan analisis kestabilan.

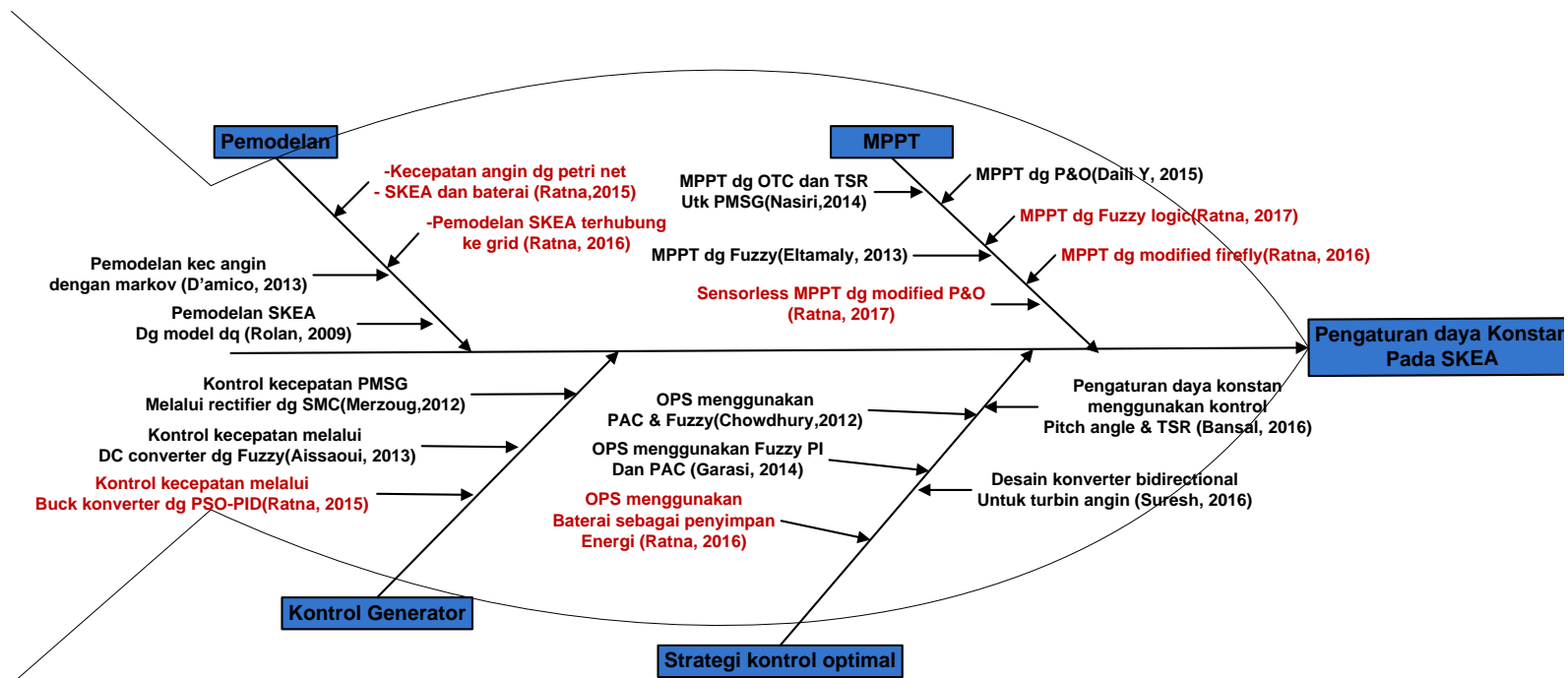
1.6.2 Roadmap Penelitian

Berdasarkan telaah pustaka dari penelitian sebelumnya, penelitian sistem konversi energi angin menggunakan PMSG dapat dibagi menjadi beberapa topik penelitian yaitu (1) pemodelan, (2) maximum power point tracking, (3) kontrol kecepatan PMSG, dan (4) strategi kontrol optimal pada sistem konversi energi angin . Ringkasan beberapa penelitian yang terkait dengan topik penelitian ini seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1.1. Pada topik penelitian ini adalah strategi kontrol optimal pada turbin angin dengan menggunakan MPPT yang terdiri dari beberapa tahapan yang terdiri dari pemodelan sistem turbin kecepatan angin, kontrol kecepatan PMSG dan ekstraksi daya maksimum, implementasi kontrol ekstraksi daya maksimum pada sistem turbin angin *stand alone* dan desain strategi kontrol optimal dengan menggunakan baterai sebagai penyimpan energi. Gambar 1.1 menunjukkan posisi penelitian ini terhadap penelitian yang telah dilakukan dalam diagram tulang ikan. Sedangkan Gambar 1.2 menunjukkan road map penelitian yang menggambarkan tahapan penelitian yang telah dan akan dilakukan.

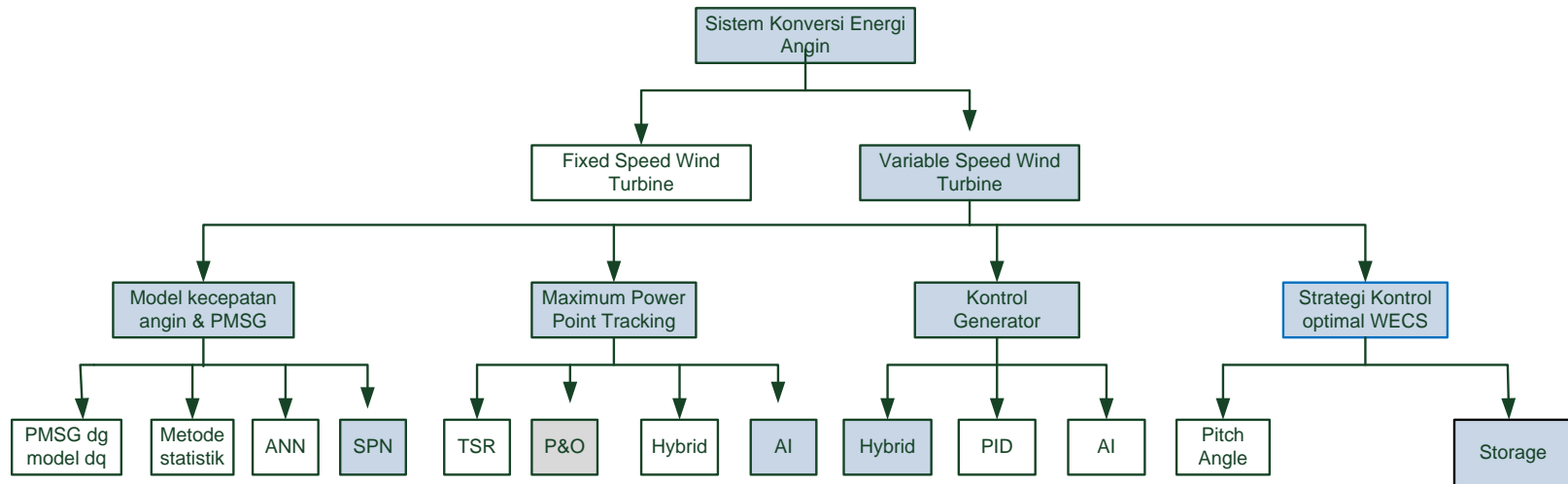
Tabel 1. 1 Ringkasan Penelitian Yang Terkait

Topik	Tahun						
	2009	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Pemodelan	Rolan A, et.al Pemodelan <i>variable speed wind turbine</i> menggunakan PMSG		Lopez, et.al Pemodelan turbin angin dengan PMSG menggunakan model dq	D'Amico Guglielmo, et.al Pemodelan kecepatan angin menggunakan markov chain orde 1 dan 2			Zou Yu, et al Pemodelan, simulasi dan implementasi sistem daya angin dengan PMSG
Maximum power point tracking		Xia Y, et.al Menerapkan MPPT menggunakan pengembangan metode P&O untuk PMSG	Abdullah M.A, et.al Menganalisis beberapa algoritma MPPT untuk sistem energi angin menggunakan PMSG	Eltamaly A M, et.al Menerapkan kontrol logika fuzzy untuk MPPT pada turbin angin dengan PMSG	Nasiri, et.al Menganalisis metode OTC dan TSR pada MPPT untuk turbin angin dengan PMSG	Daili Y, et.al Menerapkan pengembangan algoritma P&O pada turbin angin dengan PMSG	Fathabadi, et.al Mengembangkan modified P&O untuk turbin angin PMSG untuk ekstraksi daya optimal tanpa sensor mekanik
Kontrol kecepatan PMSG				Aissaoui, et.al kontrol Fuzzy-PI pada pengaturan kecepatan PMSG untuk mendapatkan			

				daya optimal			
Strategi kontrol optimal pada SKEA		Izumi Y, et.al Menerapkan logika fuzzy pada <i>output power smoothing</i> berdasarkan prediksi kecepatan angin jangka pendek Sarrias Raul, et.al Mengembangkan kontrol untuk turbin angin dengan DFIG dengan baterai menggunakan <i>state machine</i>	Chowdhury, et.al Menerapkan logika fuzzy pada pengaturan <i>pitch angle</i> untuk mengurangi fluktuasi daya Hui J, et.al Mengembangkan kontrol pada turbin angin dengan PMSG dan baterai berdasarkan MPPT menggunakan logika fuzzy	Howlader AM, et.al Menganalisis beberapa strategi <i>output power smoothing</i> pada sistem konversi energi angin	Garasi P, et.al Menerapkan Fuzzy-PI pada pengaturan <i>pitch angle</i> untuk mengurangi fluktuasi daya Satpathy AS, et.al kontrol daya ke beban DC menggunakan MPPT, kontrol pengisian baterai dan kontrol <i>pitch angle</i>	Viveiros C, et.al hirarki kontrol untuk turbin angin DFIG menggunakan <i>event-based supervisory</i> dan fuzzy PI	Chen Jiawei, et.al Desain kontroler pada VSWT dengan mengkombinasikan algoritma P&O termodifikasi dan dan PSF.



Gambar 1.1 Diagram Tulang Ikan Penelitian



Gambar 1. 2 Road Map Penelitian

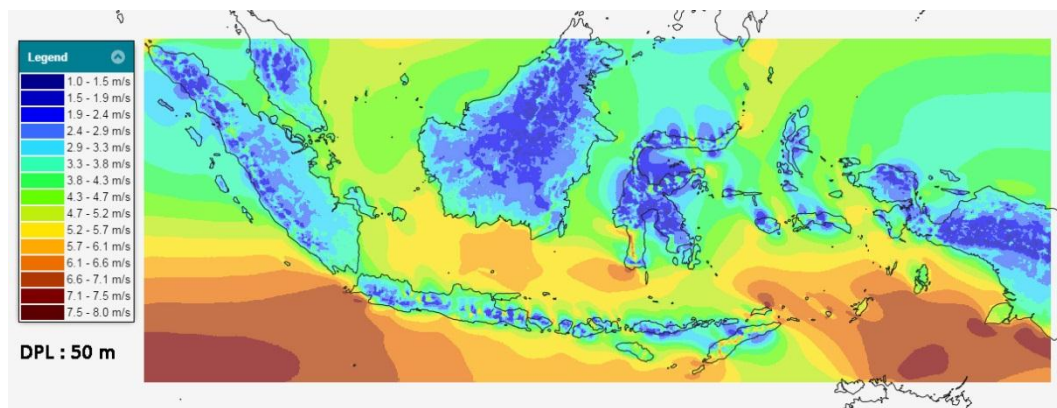
---- *Halaman ini sengaja dikosongkan*----

BAB 2

SISTEM KONVERSI ENERGI ANGIN

2.1 Potensi Energi Angin

Energi angin merupakan salah satu sumber energi yang digerakkan oleh angin. Energi angin merupakan salah satu jenis energi terbarukan sebagai energi alternatif pengganti energi fosil yang semakin menipis. Pemanfaatan energi angin sebagai pembangkit energi listrik mengalami perkembangan yang sangat pesat, untuk memenuhi kebutuhan energi listrik yang meningkat setiap tahunnya[2][44]. Pada tahun 2015, total daya angin yang telah terpasang sebagai pembangkit energi listrik di seluruh dunia sebesar 432,9 GW, yang menunjukkan pertumbuhan sebesar 17% [2]. Dibandingkan dengan energi fosil, energi angin memiliki keunggulan yaitu ramah lingkungan karena bebas polusi emisi CO₂ dan efek rumah kaca [44], mudah didapatkan, handal dan tidak terbatas [3][5]. Namun pemanfaatan energi angin ini sangat dipengaruhi kondisi cuaca dan tidak dapat diprediksi [45].

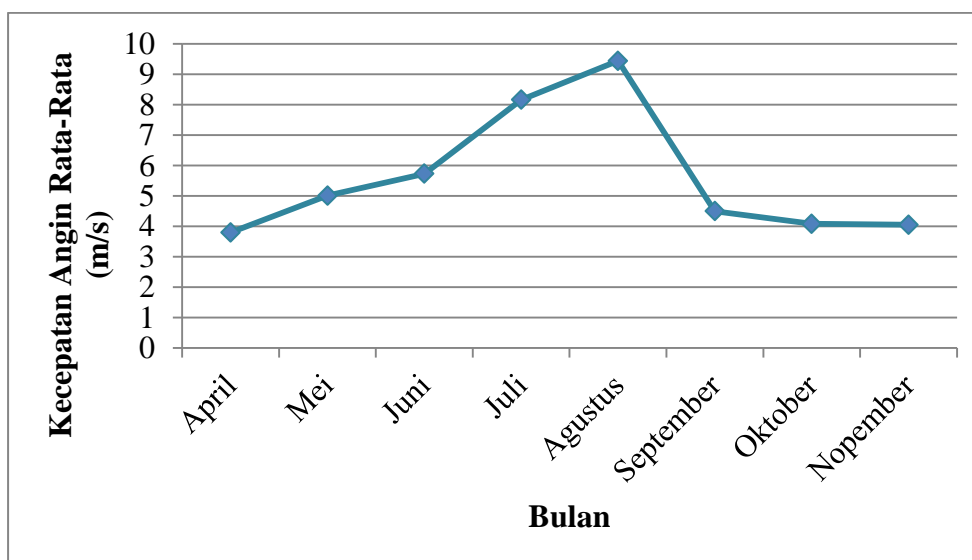


Gambar 2. 1. Potensi Energi Angin Di Indonesia [1]

Potensi energi angin ditentukan oleh kecepatan angin. Potensi energi angin di Indonesia seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1. Indonesia memiliki potensi angin yang cukup besar di daerah pesisir pantai selatan pulau sumatera, jawa dan wilayah timur Indonesia, dengan kecepatan angin rata-rata di atas 5m/s hingga 8m/s. Hal ini berkebalikan dengan ketersediaan energi listrik yang masih minim untuk wilayah timur Indonesia. Berdasarkan data BPPT, Pada

tahun 2014, rasio elektrifikasi nasional sebesar 84,4% atau meningkat 3,9% dari tahun 2013. Sedangkan konsumsi listrik dalam kurun waktu tahun 2000-2014 mengalami pertumbuhan rata-rata 6,8% per tahun[1].

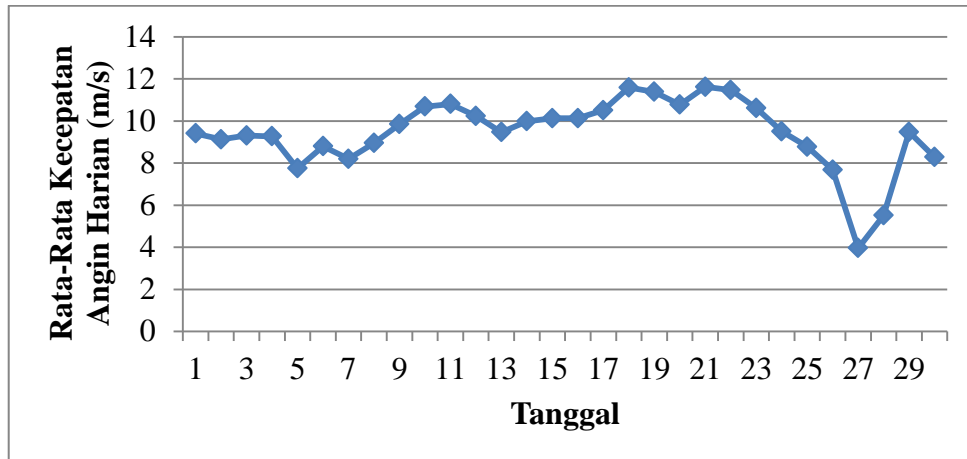
Dengan potensi energi angin yang cukup besar, di Indonesia juga telah dikembangkan pemanfaatan energi angin sebagai pembangkit energi listrik. Potensi energi angin yang dapat dimanfaatkan sebagai energi listrik sebesar 970MW. Namun hingga akhir 2015 baru terpasang sebesar 1,96MW[1]. Untuk itu dibutuhkan pengembangan teknologi sistem konversi energi angin (SKEA) yang sesuai dengan karakteristik energi angin di Indonesia.



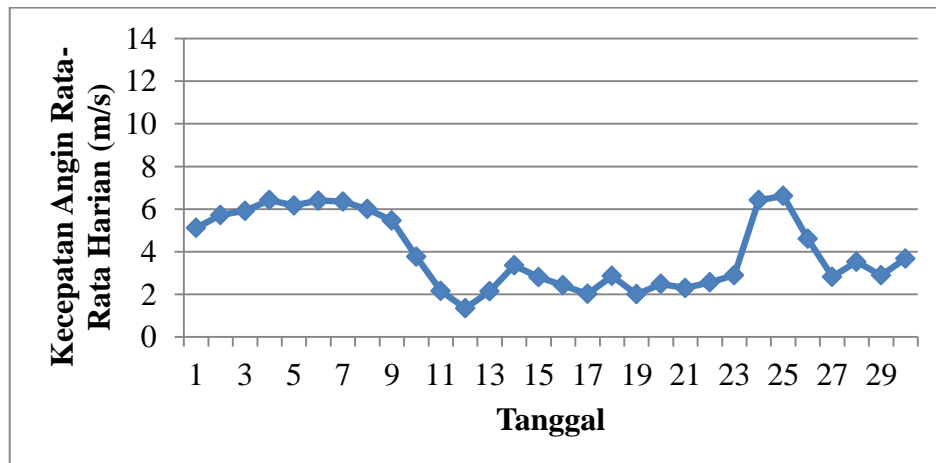
Gambar 2.2. Hasil Pengukuran Kecepatan Angin Rata-Rata Bulanan Di Nganjuk

Pada penelitian ini dilakukan pengukuran kecepatan angin secara langsung di Desa Sukomoro, Kabupaten Nganjuk selama bulan April hingga Nopember 2015. Pengukuran dilaksanakan secara kontinyu dengan waktu sampling pengambilan data selama 2 detik. Pengambilan data dilakukan dengan ketinggian 8m/s. Hasil pengukuran kecepatan angin selama 8 bulan ditunjukkan pada Gambar 2.2 yang merupakan profil kecepatan angin rata-rata bulanan di Kabupaten Nganjuk. Berdasarkan hasil pengukuran, kecepatan rata-rata bulan tertinggi di Kabupaten Nganjuk pada bulan agustus sebesar 9,44m/s dan kecepatan rata-rata terendah pada bulan april sebesar 3,8m/s. Gambar 2.3 menunjukkan profil kecepatan angin rata-rata harian pada bulan Agustus dan

bulan Oktober. Kecepatan angin rata-rata harian di bulan Agustus sebagian besar diatas 8m/s selama 26 hari dan 4 hari sisa nya dibawah 8m/s. Sedangkan kecepatan angin rata-rata harian di bulan Oktober memiliki nilai tertinggi 6,6m/s dan kecepatan angin terendah 1,3m/s.



(a) Kecepatan Angin Rata-Rata Harian Bulan Agustus



(b) Kecepatan Angin Rata-Rata Harian Bulan Oktober

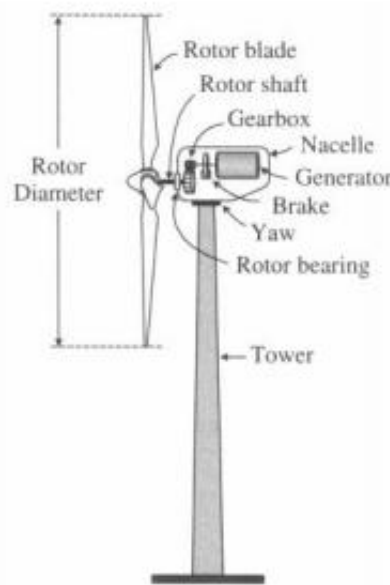
Gambar 2. 3 Hasil Pengukuran Kecepatan Angin Rata-Rata Harian Di Nganjuk

2.2 Teknologi Turbin Angin

Turbin angin merupakan salah satu komponen penting dalam sistem konversi energi angin (SKEA). Teknologi turbin angin telah dikembangkan dan dapat dikategorikan berdasarkan orientasi putaran sumbu turbin angin dan kecepatan rotasi.

2.2.1 Turbin Angin Sumbu Vertikal Dan Turbin Angin Sumbu Horisontal

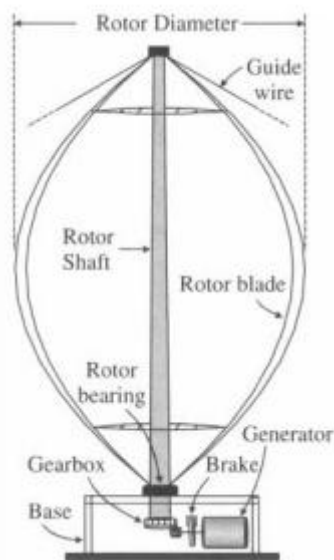
Berdasarkan orientasi putaran sumbu turbin angin terbagi menjadi dua yaitu turbin angin sumbu vertikal (TASV) dan turbin angin sumbu horisontal (TASH)[46]. Pada TASH, sumbu rotasi paralel dengan arah angin, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4. TASH membutuhkan penyangga (*tower*) untuk menempatkan poros rotor dan generator dan harus diletakkan searah dengan hembusan angin. Desain turbin ini menggunakan *blade* yang menyerupai *propeller* yang berputar secara vertikal. Penggunaan penyangga memberikan ruang yang cukup untuk perputaran *blade* rotor dan dapat menangkap angin dengan lebih baik. *Nacelle* melingkupi rotor generator yang terhubung dengan *blade*, gearbox dan konverter daya. Pada umumnya turbin jenis ini menggunakan 3-*blade* rotor dengan arah angin dari depan sehingga disebut juga dengan konfigurasi *upwind*. Walaupun turbin angin dengan konfigurasi *down wind* dengan arah angin dari belakang juga diproduksi. [47]



Gambar 2. 4 Turbin Angin Sumbu Horisontal [47]

TASH memiliki keuntungan yaitu menghasilkan konversi energi angin yang lebih tinggi, dapat mengakses angin lebih besar dengan posisi yang lebih tinggi dan dapat dilakukan pengaturan daya dan kontrol *pitch angle* pada kecepatan angin yang tinggi. Namun TASH membutuhkan biaya konstruksi yang

lebih besar karena membutuhkan tower yang tinggi dan kuat karena TASH memiliki poros rotor utama dan generator listrik di puncak menara. Turbin berukuran kecil menggunakan baling-baling angin yang sederhana yang biasa disebut dengan 3 blade atau 2 blade propeller. TASH sesuai dengan dengan kecepatan angin rendah hingga menengah.



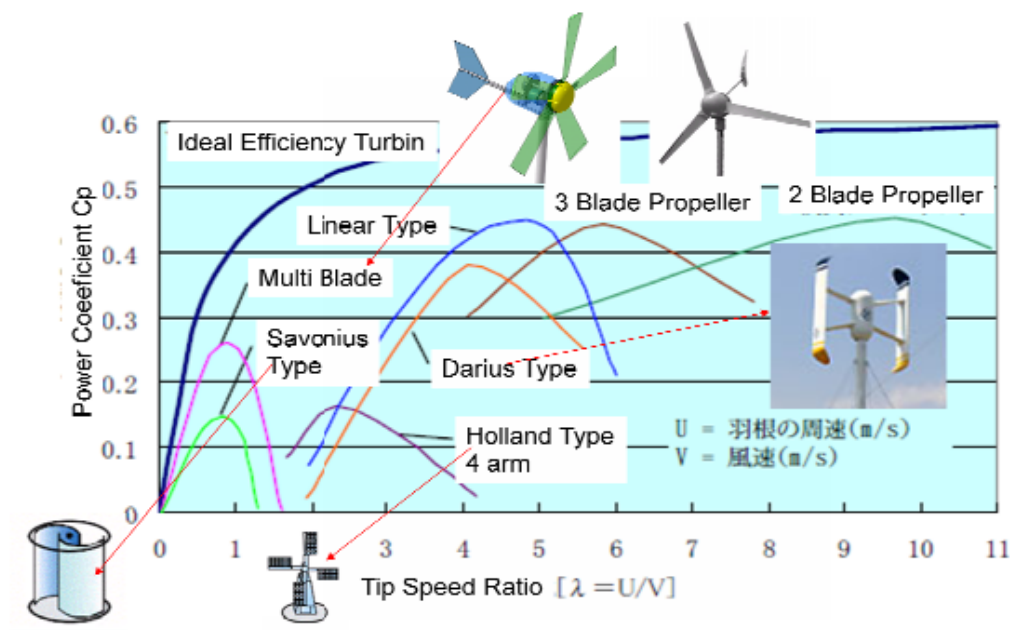
Gambar 2. 5 Turbin Angin Sumbu Vertikal [47]

TASV disebut juga dengan rotor Darius sesuai dengan nama penemunya. TASV memiliki poros/sumbu rotor utama yang disusun tegak lurus, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5. Kelebihan jenis ini yaitu turbin tidak harus diarahkan ke angin untuk menjadi efektif sehingga sangat berguna untuk daerah dimana arah angin bervariasi. Selain itu biaya instalasi rendah dan perawatan lebih mudah karena gearbox dan generator diletakkan di atas tanah sehingga tidak membutuhkan tower. Namun TASV memiliki efisiensi konversi energi angin yang rendah dan memiliki keterbatasan pada pengaturan daya pada kecepatan angin yang tinggi sehingga menghasilkan fluktuasi torsi yang lebih tinggi [47]. Saat ini terdapat beberapa jenis turbin yang berada di pasaran yaitu

- Tipe Holland (belanda)
- Tipe Savonius
- Tipe Darius
- Tipe Linier

- Tipe 2 blade propeller
- Tipe 3 blade propeller
- Tipe Multi blade

Perbandingan efisiensi beberapa jenis turbin ditunjukkan pada Gambar 2.6. Semakin tinggi efisiensi suatu turbin, semakin maksimal pula turbin tersebut mengkonversi energi yang didapatnya. Tipe Savonius dan Holland memiliki efisiensi terendah sedangkan tipe turbin yang memiliki tingkat efisiensi paling tinggi adalah tipe 3 blade propeller yang memiliki koefisien daya (C_p) mendekati 45%. Sehingga saat ini tipe turbin 3 blade propeller dan 2 blade propeller banyak digunakan dan dijumpai pada produk-produk komersil. Perbandingan antara TASH dan TASV ditunjukkan pada Tabel 2.1



Gambar 2. 6 Jenis Turbin Angin Berdasarkan Orientasi Putaran Sumbu

Tabel 2. 1. Perbandingan Antara TASV dan TASH

Jenis Turbin	Kelebihan	Kekurangan
TASH	Efisiensi konversi energi lebih tinggi	Biaya instalasi lebih mahal karena membutuhkan <i>tower</i> yang tinggi dan kuat

	Dapat menangkap kekuatan angin lebih besar karena penggunaan <i>tower</i> yang tinggi	Membutuhkan kontrol <i>yaw</i> sebagai mekanisme untuk mengarahkan blade ke arah angin
	Pengaturan daya pada kecepatan angin tinggi melalui kontrol <i>pitch angle</i> dan <i>stall</i>	Membutuhkan kabel yang lebih panjang dari atas <i>tower</i> hingga ke bawah karena peralatan diletakkan diatas <i>tower</i>
TASV	Biaya instalasi lebih murah	Efisiensi konversi lebih rendah
	Perawatan lebih mudah karena semua peralatan terletak ditanah	Fluktuasi torsi lebih tinggi dan mudah terjadi vibrasi mekanik
	Peletakkan tidak tergantung pada arah angin	Pada kecepatan angin tinggi sulit untuk dilakukan pengaturan daya
	Tidak membutuhkan <i>tower</i>	

2.2.2 Variable Speed Wind turbine dan Fixed Speed Wind turbine

Berdasarkan kecepatan rotasi, turbin angin dibagi menjadi dua yaitu kecepatan tetap (*fixed speed wind turbine*) dan kecepatan berubah (*variable speed wind turbine*). Pada turbin angin kecepatan tetap maka rotor berputar pada kecepatan angular konstan terhadap perubahan angin yang ditentukan oleh perbandingan gear, frekuensi grid dan jumlah pole generator. *Fixed speed wind turbine* (FSWT) disebut juga dengan konsep Danish yang sangat populer pada tahun 1980-an [48]. FSWT memiliki keuntungan yaitu merupakan sistem yang sederhana dan banyak digunakan karena biaya perawatan yang rendah dengan mengurangi penggunaan rangkaian elektronika daya yang mahal seperti inverter dan konverter. Namun dengan kecepatan yang konstan maka turbin tidak dapat beroperasi pada efisiensi puncak dengan kecepatan angin yang berubah sehingga energi yang dihasilkan kecil. Efisiensi konversi maksimal dapat dicapai hanya pada kecepatan angin tertentu dan efisiensi sistem konversi maksimal akan meurun pada kecepatan angin yang lain. Turbin dibatasi oleh kontrol aerodinamik blade dari kemungkinan kerusakan yang disebabkan oleh kecepatan angin yang

tinggi. FSWT menghasilkan fluktuasi daya keluaran ke grid yang tinggi sehingga menyebabkan gangguan ke sistem daya. Turbin jenis ini juga membutuhkan desain mekanik yang kokoh dan mahal untuk dapat menyerap tekanan mekanik yang tinggi.

Variable speed wind turbine (VSWT) dapat mencapai efisiensi konversi energi angin maksimum pada jangkauan kecepatan angin yang lebar. Turbin dapat mengatur kecepatan rotasi berdasarkan kecepatan angin yang sebanding dengan kecepatan rotor. Untuk mencapai efisiensi konversi daya maksimum pada kecepatan angin berbeda yaitu dengan mempertahankan *tip speed ratio* (TSR) pada kondisi optimal. TSR merupakan perbandingan antara kecepatan tip blade dan kecepatan angin. Generator turbin angin pada VSWT dihubungkan ke grid melalui sistem konverter daya. Sistem konverter mengaktifkan kontrol kecepatan generator yang secara mekanik dikopel pada rotor turbin angin. Keuntungan utama VSWT yaitu meliputi peningkatan keluaran energi angin, meningkatkan kualitas daya dan mengurangi stres mekanik. Dibandingkan sistem FSWT, sistem VSWT dapat menangkap energi angin 5% lebih besar dan daya aktif dan reaktif yang dihasilkan dapat dengan mudah dikontrol. Kekurangan sistem ini yaitu biaya yang lebih tinggi karena penggunaan konverter daya sehingga meningkatkan rugi-rugi daya dan kompleksitas pengontrolan. Walaupun hal tersebut dikompensasi dengan produksi energi yang lebih tinggi. Biaya untuk konverter elektronika daya dapat mencapai sekitar 7% dari keseluruhan biaya sistem turbin angin [48]. Perbandingan antara FSWT dan VSWT seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.2.

Tabel 2. 2. Perbandingan antara FSWT dan VSWT

Jenis Turbin	Kelebihan	Kekurangan
FSWT	Sederhana, tangguh dan handal	Efisiensi konversi energi rendah
	Biaya perawatan rendah	Stress mekanik tinggi
	Biaya instalasi murah	Fluktuasi daya ke grid besar
VSWT	Efisiensi konversi energi tinggi	Sistem kontrol lebih kompleks

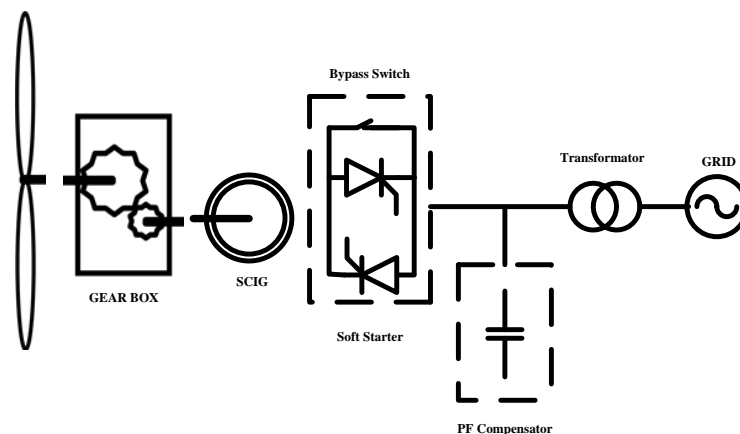
	Mengurangi stress mekanik	Rugi daya akibat penggunaan converter lebih besar
	Kualitas daya lebih baik	Biaya instalasi lebih tinggi

2.3 Konfigurasi Sistem Konversi Energi Angin (SKEA)

Generator dan konverter daya merupakan komponen penting di dalam SKEA. Berdasarkan jenis generator dan penggunaan konverter daya, SKEA dapat dibagi menjadi: SKEA dengan kecepatan konstan tanpa konverter daya, SKEA dengan kecepatan berubah dengan konverter daya *partial scale* dan SKEA dengan kecepatan berubah dengan converter daya *full scale*.

2.3.1 SKEA kecepatan konstan tanpa konverter daya

Konfigurasi SKEA kecepatan konstan menggunakan *squirrel cage induction generator* (SCIG) dan gearbox yang terhubung ke grid melalui transformator secara langsung, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.7. Kecepatan rotasi generator ditentukan oleh frekuensi grid dan jumlah pole kumparan stator. Pada kecepatan angin berbeda, kecepatan generator bervariasi sebesar 1% dari kecepatan rata-rata. Gearbox digunakan untuk menyesuaikan perbedaan kecepatan antara turbin dan generator sehingga generator dapat mengirim daya rata-rata pada kecepatan angin rata-rata. Konfigurasi ini membutuhkan *soft starter* untuk membatasi lonjakan arus yang tinggi pada waktu sistem *start up*[47].

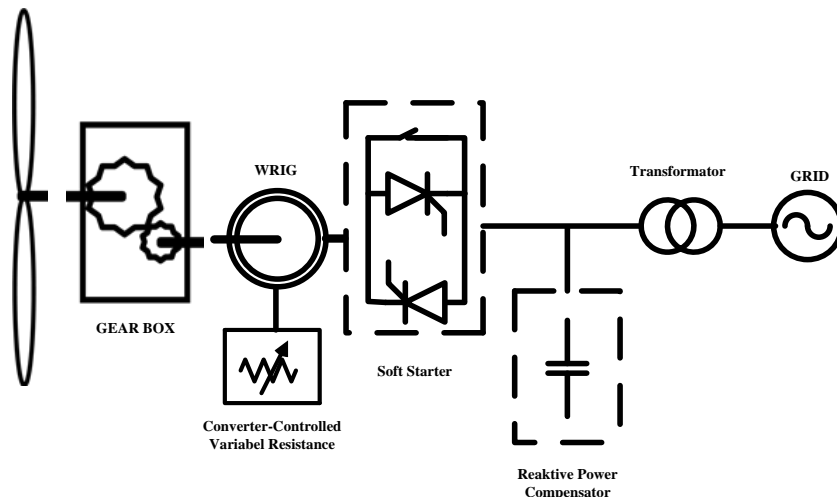


Gambar 2. 7 SKEA Dengan Kecepatan Konstan Tanpa Konverter Daya

Kelebihan konfigurasi ini yaitu sederhana, biaya perawatan rendah dan handal. Namun sistem ini juga memiliki kekurangan yaitu:

- Kecepatan SCIG untuk konfigurasi ini tidak dapat dikontrol dan hanya bervariasi disekitar kecepatan sinkron sehingga energi maksimum tidak dapat ditangkap dari angin yang melebihi jangkauan kecepatan angin
- Sistem mengirim daya rata-rata ke grid hanya pada kecepatan angin tertentu sedangkan pada kecepatan angin yang lain memiliki efisiensi konversi energi yang rendah.
- Daya yang dikirim ke grid berfluktuasi terhadap kecepatan angin sehingga menyebabkan gangguan pada grid.
- Penggunaan gearbox menyebabkan disipasi panas karena gesekan dan membutuhkan perawatan rutin.[6]

2.3.2 SKEA kecepatan berubah dengan konverter daya *partial scale*

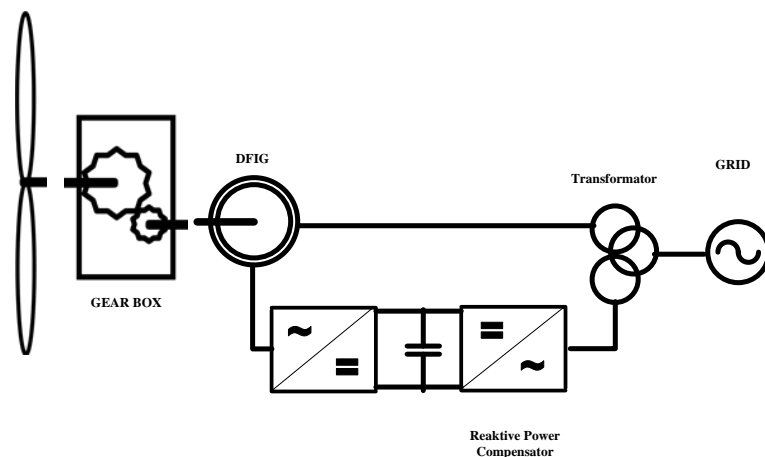


Gambar 2. 8 SKEA Dengan *Wound Rotor Induction Generator*

SKEA kecepatan berubah memiliki keuntungan yang mengatasi kekurangan konfigurasi SKEA kecepatan konstan yaitu peningkatan efisiensi konversi energi dan mengurangi stress mekanik yang disebabkan oleh hembusan angin yang kencang [47]. Selain itu struktur konfigurasi ini dapat mengurangi penggunaan gearbox dan mengurangi kebutuhan perawatan. Kelemahan utama dari konfigurasi ini yaitu kebutuhan akan konverter daya untuk mengatur kecepatan generator sehingga menambah biaya dan kompleksitas sistem. Namun

konverter daya dapat mengatur daya aktif dan reaktif pada sisi grid. Berdasarkan konverter daya yang digunakan, SKEA kecepatan berubah terbagi menjadi dua yaitu SKEA dengan kecepatan berubah dengan konverter daya *partial scale* dan SKEA dengan kecepatan berubah dengan konverter daya *full scale*. SKEA dengan *partial scale* dapat terbagi menjadi dua yaitu menggunakan *wound rotor induction generator* (WRIG) dan *double fed induction generator* (DFIG).

SKEA kecepatan berubah dengan konverter daya *partial scale* menggunakan *wound rotor induction generator* (WRIG), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.8. pengaturan kecepatan dapat dicapai melalui pengaturan arus rotor tanpa perlu untuk memproses daya total dari sistem. Kumparan rotor dihubungkan dengan resistor variabel yang dapat di atur oleh sistem kontrol elektronik. Perubahan resistansi rotor akan mempengaruhi karakteristik kecepatan/torsi generator. Untuk meningkatkan jangkauan kecepatan variabel maka nilai resistor juga harus tinggi. Jangkauan kecepatan konfigurasi ini tergantung pada nilai resistor yang digunakan dan kurang dari 10% diatas kecepatan sinkron. Pada WRIG membutuhkan operasi pada kecepatan lebih tinggi daripada kecepatan sinkron untuk menghasilkan energi listrik [6]. Konfigurasi ini juga membutuhkan *soft starter* dan kompensasi daya reaktif.



Gambar 2.9 SKEA Kecepatan Berubah Dengan *Double Fed Induction Generator*

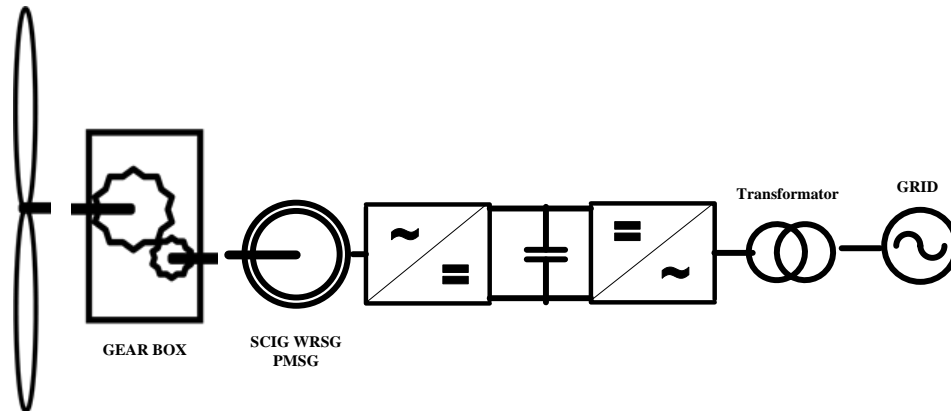
Konfigurasi SKEA dengan kecepatan berubah dengan menggunakan DFIG, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.9. Rotor dari DFIG terhubung ke

grid melalui konverter daya, antara lain menggunakan konverter back to back. Sedangkan stator dari DFIG terhubung langsung ke grid. DFIG dapat mengirim langsung energi angin ke grid dalam jangkauan kecepatan sekitar $\pm 30\%$ kecepatan sinkron dan daya nominal konverter daya hanya sekitar 30% dari daya rata-rata turbin angin. Kecepatan generator dapat diatur untuk mengoptimasi ekstraksi daya dari angin melalui pengaturan daya aktif pada konverter sisi rotor. Selain itu daya reaktif yang dikirim ke grid juga dapat di atur oleh konverter sisi rotor melalui pemisahan daya aktif dan reaktif. Namun beberapa kerugian konfigurasi ini yaitu :

- Slip ring dan *brush* pada DFIG membutuhkan perawatan rutin dan memungkinkan dapat menyebabkan kegagalan mesin dan rugi-rugi elektrik.
- Kemampuan *fault ride through* (FRT) pada SKEA dengan DFIG relative lemah karena hubungan langsung stator DFIG ke grid. [6]

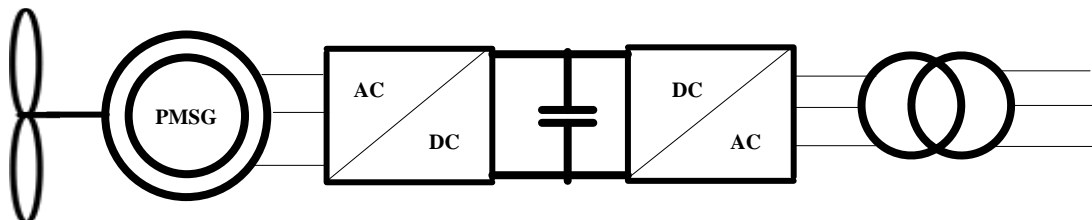
2.3.3 SKEA kecepatan berubah dengan konverter daya *full scale*

Penggunaan konverter daya dengan kapasitas penuh dapat meningkatkan performansi sistem energi angin. Gambar 2.10 menunjukkan konfigurasi SKEA kecepatan berubah dengan konverter daya *full scale* yang terdiri dari turbin angin, gearbox, generator, konverter daya dan transformator. Generator yang dapat digunakan pada konfigurasi ini yaitu *squirrel cage induction generator* (SCIG), *wound rotor synchronous generator* (WRSG) dan *permanent magnet synchronous generator* (PMSG). Rating daya dari konverter umumnya sama dengan generator. Penggunaan konverter daya menyebabkan generator terpisah secara penuh dari grid dan dapat beroperasi dalam jangkauan penuh. Hal ini menyebabkan sistem memiliki kompensasi daya reaktif dan hubungan grid yang lebih baik [47].



Gambar 2. 10 SKEA Kecepatan Berubah Dengan Konverter Daya *Full Scale*

Penggunaan SCIG memiliki keuntungan struktur yang sederhana, biaya rendah dan kehandalan yang tinggi. SCIG dengan gearbox terhubung ke grid melalui konverter *back to back full scale*. Kecepatan generator dapat bervariasi melalui pengaturan konverter sisi generator sedangkan tegangan bus DC dan daya reaktif yang dikirim ke grid dapat dikontrol melalui konverter sisi grid. Kelemahan konfigurasi dengan SCIG ini adalah biaya yang tinggi dan rugi-rugi pada konverter daya[47].



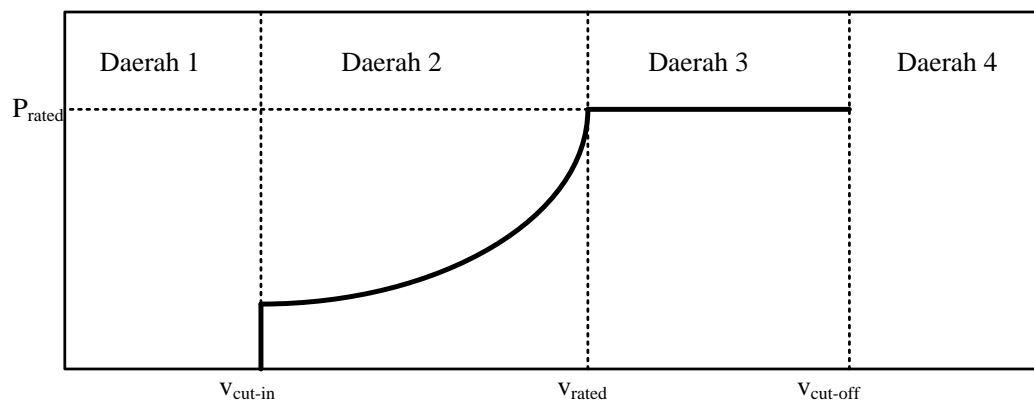
Gambar 2. 11 SKEA Kecepatan Berubah Dengan Konverter Daya *Full Scale* Tanpa Gearbox

Penggunaan *multiple-stage* gearbox dapat mengurangi volume dan berat dari WRSR dan PMSG. PMSG lebih banyak digunakan karena memiliki efisiensi tinggi dan struktur yang lebih tangguh. Namun penggunaan gearbox dapat menyebabkan rugi-rugi terutama pada generator kecepatan tinggi. Saat sistem energi angin dapat beroperasi tanpa menggunakan gearbox dengan menggunakan generator sinkron kecepatan rendah dan jumlah pole yang besar, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.11. Pengurangan penggunaan gearbox meningkatkan efisiensi sistem dan mengurangi biaya awal dan perawatan. PMSG dengan

kecepatan menengah dan konverter daya *full scale* untuk SKEA pertama kali diperkenalkan oleh sistem Multibrid, Jerman, sehingga sistem ini disebut dengan sistem Multibrid [47].

2.4 Karakteristik Daya Turbin Angin

Gambar 2.12 menunjukkan kurva karakteristik daya turbin angin yang terdiri dari empat daerah. Daerah pertama merupakan daerah kecepatan rendah dengan jangkauan kecepatan angin hingga $V_{\text{cut-in}}$, sedangkan daerah kedua merupakan daerah kecepatan moderat atau menengah dengan jangkauan antara $V_{\text{cut-in}}$ hingga kecepatan angin rata-rata (V_{rated}). Daerah ketiga merupakan daerah kecepatan tinggi dengan jangkauan antara V_{rated} hingga kecepatan angin cut off ($V_{\text{cut-off}}$) dan daerah keempat merupakan daerah dengan kecepatan angin diatas $V_{\text{cut-off}}$. Pada daerah kecepatan rendah, turbin angin seharusnya tidak beroperasi dan tidak terhubung ke grid. Demikian pula pada daerah keempat, turbin angin harus dalam kondisi *shut down* untuk menghindari kerusakan mekanik dan overload yang disebabkan oleh kecepatan angin yang terlalu besar [49]. Pada daerah kedua dimana kecepatan angin diatas $V_{\text{cut-in}}$ hingga V_{rated} , fungsi utama dari kontroler untuk meningkatkan efisiensi SKEA agar dapat menghasilkan daya maksimum [45][50][13][35]. Untuk meningkatkan efisiensi SKEA, sistem harus beroperasi pada titik daya maksimum yang tergantung pada kecepatan angin. Sehingga dibutuhkan kontroler ekstraksi daya maksimum SKEA dilakukan melalui pengaturan konverter daya menggunakan algoritma *maximum power point tracking* (MPPT) untuk mendapatkan titik daya maksimum.



Gambar 2. 12 Kurva Daya Turbin Angin

Sedangkan pada daerah ketiga dengan kecepatan angin yang tinggi daya yang dihasilkan turbin dibatasi pada daya rata-rata sehingga turbin dan generator tidak *overload* dan beban dinamik tidak mengakibatkan kerusakan mekanik. Untuk mendapatkan daya rata-rata pada daerah ini dapat dilakukan dengan menggunakan kontrol *pitch angle*, kontrol *stall* dan penggunaan penyimpan energi seperti baterai, supercapasitor dan flywheel.

2.5 Topologi Konverter Daya Pada VSWT Dengan PMSG

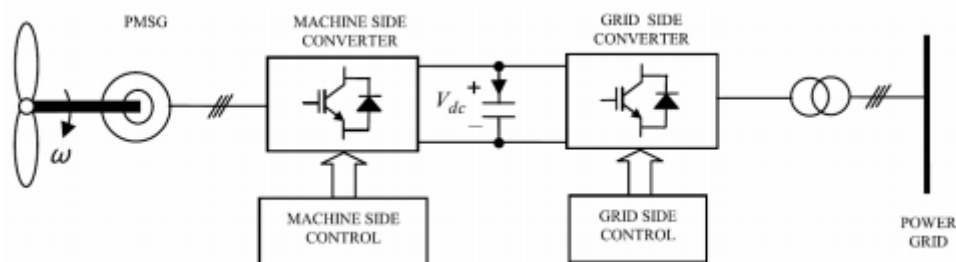
Konverter daya merupakan peralatan elektronika daya yang disusun dari komponen semikonduktor dan mengkonversi sinyal elektrik dari satu bentuk tertentu ke bentuk yang lain [51]. Konverter daya merupakan komponen penting di dalam sistem kontrol SKEA untuk meningkatkan efisiensi konversi energi. Aplikasi konverter daya pada SKEA bertujuan untuk mengontrol daya aktif dan reaktif SKEA, mencari titik daya angin maksimal dan mencapai efisiensi daya angin maksimum. Oleh karena itu pemilihan struktur topologi menentukan performansi sistem[52]. Penggunaan konverter daya tergantung pada konfigurasi SKEA. Pada penelitian ini menggunakan *variable speed wind turbine* (VSWT) dengan PMSG sehingga konverter daya yang sesuai untuk sistem energi angin tersebut adalah konverter daya *full scale* [6][47]. Berdasarkan hubungan antara jenis arus masukan dan keluaran, konverter daya dapat diklasifikasikan menjadi [51].

1. *Rectifier* (Penyearah), merupakan rangkaian yang menerima sinyal masukan AC dan mengkonversi menjadi sinyal keluaran DC.
2. *Inverter*, merupakan rangkaian yang menerima sinyal DC dan mengkonversi menjadi sinyal keluaran AC.
3. *Chopper* (konverter DC/DC), merupakan rangkaian yang menerima masukan sinyal DC dan mengkonversi menjadi sinyal keluaran DC tertentu.
4. *Cycloconverter* (konverter AC/AC), merupakan rangkaian yang menerima sinyal masukan AC dan mengkonversi menjadi sinyal keluaran AC melalui pengaturan frekuensi.

Konverter daya pada VSWT dengan PMSG yang terhubung ke grid terbagi menjadi dua bagian utama yaitu *rotor side converter* (RSC) dan *grid side converter* (GSC). Pada RSC terdapat beberapa topologi konverter daya *full scale* yang dapat digunakan pada sistem energi yaitu back to back converter, penyearah dioda, dan penyearah dioda terhubung *chopper*. Sedangkan pada GSC menggunakan *voltage source inverter* (VSI) untuk menghubungkan DC-link dan grid. Pengaturan GSC bertujuan untuk mempertahankan tegangan DC-link konstan sehingga tegangan yang dikirim ke grid dapat konstan walaupun kecepatan angin berfluktuasi.

2.5.1 Konverter Back to Back

Gambar 2.13 menunjukkan sistem energi angin VSWT dengan PMSG yang menggunakan konverter *back to back* dimana stator generator terhubung ke grid melalui dua konverter. Konverter terdiri dari dua bagian yaitu *rotor side converter* (RSC) dan *grid side converter* (GSC) yang merupakan *voltage source inverter* (VSI). RSC merupakan *active rectifier* yang berfungsi untuk mengontrol torsi elektromagnetik generator dan daya reaktif stator melalui pengaturan arus sumbu d dan sumbu q dari sisi stator. Oleh karena itu generator akan beroperasi dengan kecepatan berubah dan frekuensi konstan untuk mencapai energi angin maksimum pada kecepatan angin dibawah kecepatan rata-rata. *Active rectifier* merupakan penyearah terkontrol yang terdiri dari enam komponen *switching*. Sedangkan GSC berfungsi untuk mengatur arus dari sisi grid untuk mempertahankan tegangan DC-link konstan. Selain itu pengaturan daya aktif dan reaktif dapat dikontrol secara terpisah. GSC juga harus memastikan *total harmonic distortion* (THD) pada keluaran konverter sekecil mungkin sehingga akan meningkatkan kualitas daya grid [52].

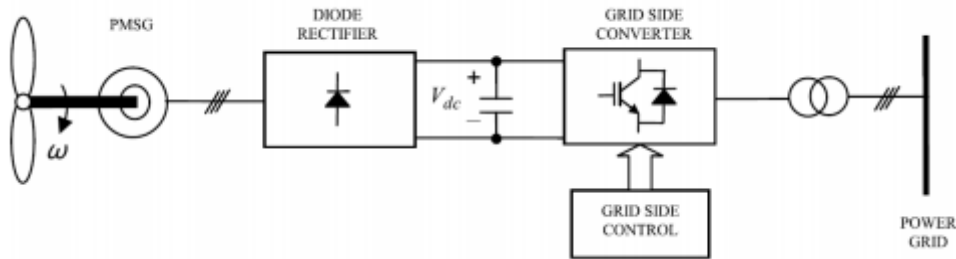


Gambar 2. 13 Konverter *Back to Back* Pada VSWT Dengan PMSG

Konverter *back to back* telah digunakan pada beberapa penelitian karena kedua sisi konverter baik generator dan grid memiliki rangkaian yang sama sehingga algoritma dan rangkaian kontrol yang digunakan juga sama [53-55]. Selain itu konverter ini memiliki efisiensi yang tinggi sehingga dapat mengatur kecepatan generator dan mengirim daya ke grid dengan baik. Beberapa penelitian mengembangkan rangkaian ini dengan menggunakan lebih dari dua level konverter (konverter multilevel) untuk meningkatkan efisiensi [53][56]. Penggunaan topologi ini lebih sesuai untuk sistem turbin angin dengan daya tinggi[54]. Namun penggunaan topologi ini memiliki kekurangan yaitu membutuhkan kontroler yang kompleks dan mahal karena membutuhkan 12 pulsa *pulse width modulation* (PWM) untuk rangkaian *rectifier* dan *inverter*. Dalam pengaplikasiannya, sistem kontrol untuk topologi ini membutuhkan paling sedikit dua unit atau lebih mikrokontroler, *digital signal processor* (DSP) atau lainnya sebagai *chip* kontroler. Selain itu rangkaian kontrol pada sisi RSC sering membutuhkan pengukuran kecepatan motor dan informasi lainnya sehingga membutuhkan biaya yang lebih tinggi [52].

2.5.2 Penyearah Dioda

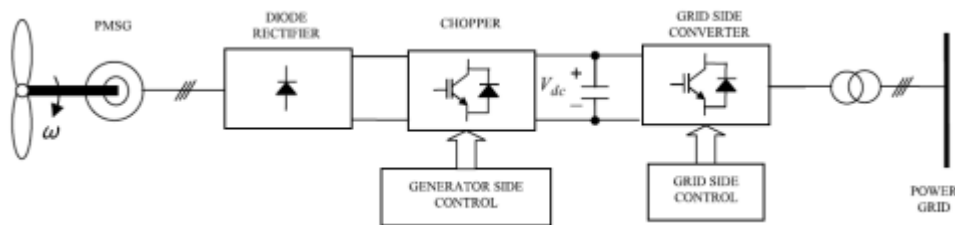
Penyearah dioda digunakan secara luas sebagai konverter AC-DC yang mengkonversi sinyal masukan AC menjadi sinyal keluaran DC. Gambar 2.14 menunjukkan sistem energi angin VSWT dengan PMSG yang terhubung ke grid menggunakan penyearah dioda dan GSC. Penyearah dioda sebagai *passive rectifier* (penyearah pasif), disebut juga *uncontrolled rectifier*, berfungsi mengkonversi tegangan keluaran AC dari PMSG menjadi tegangan DC. GSC, seperti halnya pada topologi konverter *back to back*, merupakan VSI yang akan menghubungkan *DC-link* ke grid. Penggunaan penyearah dioda ini sistem turbin angin tidak dapat mengontrol arus maupun tegangan generator sehingga titik operasi turbin angin akan tetap walaupun kecepatan angin berfluktuasi.



Gambar 2. 14 Penyearah Dioda Pada VSWT Dengan PMSG

Kelebihan topologi ini pada sistem turbin angin yaitu sederhana dan biaya yang rendah karena tidak membutuhkan kontrol pada sisi generator. Namun pengaturan pada sisi grid akan lebih sulit karena membutuhkan pengaturan lebih pada sisi DC untuk mengatur kecepatan generator. Selain itu penggunaan topologi ini mengakibatkan faktor daya generator rendah. Masalah lain pada topologi ini yaitu ketika tegangan keluaran penyearah lebih rendah dari grid maka daya tidak dapat diinjeksikan ke grid. Oleh karena itu topologi ini hanya digunakan pada kecepatan angin tinggi [54].

2.5.3 Penyearah dioda dan *Chopper*



Gambar 2. 15 Penyearah Dioda Dengan *Chopper* Pada VSWT Dengan PMSG

Gambar 2.15 menunjukkan sistem energi angin dengan PMSG yang terhubung ke grid dengan menggunakan topologi penyearah dioda yang terhubung ke *chopper*. Penyearah dioda yang digunakan merupakan penyearah dioda tiga fasa dan *chopper* yang umum digunakan pada sistem turbin angin yang terhubung ke grid adalah konverter boost. Topologi ini biasa digunakan pada sistem daya angin skala kecil[52]. Koreksi faktor daya dapat dicapai dengan mengaplikasikan konverter boost pada bagian masukan sehingga sistem juga dapat meningkatkan efisiensi generator. Ketika kecepatan angin berubah maka tegangan keluaran

penyearah tak terkendali juga akan berubah. Namun melalui pengaturan *duty cycle* pada konverter boost maka pengaturan torsi elektromagnetik dan kecepatan generator dapat dilakukan sehingga energi angin maksimum dapat dicapai.

Aubree [57] membandingkan penggunaan penyearah dioda terkendali pada konfigurasi konverter *back to back* dan penyearah dioda terhubung boost converter pada SKEA dengan menerapkan MPPT. Berdasarkan hasil simulasi topologi penyearah dioda yang terhubung ke boost converter menghasilkan energi dan daya keluaran yang lebih besar dibandingkan dengan konverter *back to back*. Topologi ini dapat menghasilkan daya lebih pada jangkauan angin yang lebih lebar dan digunakan untuk mengatur tegangan DC-link ke level tegangan yang lebih tinggi dari tegangan grid. Kelebihan dari topologi ini sederhana, memiliki solusi dengan daya yang lebih tinggi dan biaya yang efektif. Dibandingkan dengan konverter *back to back*, topologi ini lebih mudah dalam pengaturan karena hanya satu komponen *switching* yang perlu di atur. Kekurangan dari topologi ini yaitu distorsi arus harmonik yang tinggi pada kumparan generator. Untuk mengatasi hal ini dapat dilakukan dengan memasang filter kapasitor keluaran penyearah dioda[20]. Pada penelitian ini menggunakan topologi ini untuk menghubungkan turbin angin dengan grid. Hal ini dilakukan karena kecepatan angin di daerah Indonesia termasuk kecepatan angin rendah dan menengah. Selain itu dengan kecepatan angin tersebut dan pemenuhan energi listrik pada daerah tertinggal maka SKEA dengan skala daya rendah lebih sesuai untuk diterapkan sehingga topologi ini lebih sesuai untuk diaplikasikan pada sistem energi angin tersebut.

-----*Halaman Ini Sengaja Dikosongkan*-----

BAB 3

PEMODELAN SISTEM KONVERSI ENERGI ANGIN DENGAN PMSG

3.1 Pemodelan Kecepatan Angin

Kecepatan angin sangat menentukan energi listrik yang dihasilkan oleh sistem turbin angin. Seperti yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya, dimana daya yang dihasilkan oleh suatu turbin angin tergantung pada kecepatan angin yang berfluktuasi secara acak. Karakteristik kecepatan angin yang tidak menentu, tidak dapat dikontrol dan bervariasi terhadap waktu dan tempat sehingga dapat menyebabkan gangguan pada daya yang dikirim ke beban ataupun grid[18][58]. Oleh karena itu dibutuhkan pemodelan kecepatan angin untuk mengevaluasi dan mendesain kontrol dari suatu sistem turbin angin untuk menghasilkan performansi yang baik.

Beberapa penelitian telah dikembangkan untuk memodelkan kecepatan angin, dimana pemodelan kecepatan angin dapat dibagi menjadi beberapa metode yaitu metode fisik, metode stokastik, metode heuristic dan metode hybrid. Metode fisik merupakan suatu model yang melukiskan hubungan secara fisik antara kondisi atmosfer, kecepatan angin dan topografi suatu daerah. Metode statistik dapat dimodelkan dengan lebih mudah dan lebih ekonomis dibandingkan dengan metode yang lain[59]. Beberapa metode Statistik yang telah dikembangkan dengan menggunakan Auto Regressive (AR), Auto Regressive Moving Average (ARMA), Normal Distribution, Weibull Distribution dan markov model[16][60-61]. Model semi markov digunakan untuk menghasilkan data kecepatan angin sintetik. Model yang dihasilkan dibandingkan dengan data kecepatan angin real. Berdasarkan hasil perbandingan didapatkan model kecepatan angin dengan semi markov memiliki autokorelasi yang tinggi dan fungsi probabilitas yang baik [16]. Sedangkan metode Heuristik menggunakan artificial neural network, genetic algorithm, dan logika fuzzy untuk memprediksi kecepatan angin. Artificial neural network (ANN) merupakan metode terbaik yang dapat digunakan untuk prediksi time series. ANN model digunakan untuk

menyatakan suatu hubungan non linier yang kompleks [62]. Dibandingkan dengan artificial neural network, ARIMA menghasilkan mean square error minimum yang menunjukkan performansi peramalan yang lebih baik. Namun ketelitian hasil dari ARIMA sangat tergantung pada pemilihan nilai parameter ARIMA[20]. Dibandingkan dengan ARIMA, penggunaan neural network dapat mengurangi *error* prediksi jika menggunakan data masukan lebih dari satu. Penggunaan metode heuristik membutuhkan memori yang cukup besar dibandingkan dengan metode stokastik. Sedangkan untuk jangkauan kecepatan angin yang lebar, penggunaan metode statistik dengan markov model membutuhkan *state* dalam jumlah yang sangat banyak [16][18]. Oleh karena itu untuk mengatasi masalah ini, *Stochastic Petri Net* (SPN) dapat digunakan untuk menghasilkan model kecepatan angin yang didasarkan pada markov model.

SPN dapat memodelkan proses atau data yang memiliki karakteristik stokastik dan acak. SPN dikembangkan berdasarkan pada markov model sehingga dapat menyederhanakan *state* pada markov model. Dibandingkan dengan metode stokastik, keunggulan model SPN yaitu kesederhaannya dan kemudahan dalam penggunaannya karena menggunakan diagram *state-transition*. SPN adalah metode pemodelan berdasarkan pada *state* yang lebih ketat dalam semantik dari metode yang didasarkan pada *event* (kejadian)[63]. Dibandingkan dengan markov model, SPN memiliki jumlah *state* yang lebih sedikit sehingga menjadi model yang lebih sederhana. Stochastic Petri Nets didasarkan pada Petri Nets, yang ditemukan oleh Dr. Carl Adam Petri pada tahun 1962. Petri Nets menggabungkan teori matematika dan representasi grafis dari perilaku dinamis suatu sistem[64]. Stochastic Petri Nets telah digunakan untuk pemodelan dalam Bahasa Bisnis Proses Eksekusi (BPEL)[65], untuk manajemen pemodelan alur kerja[9], dan untuk deteksi kesalahan dan isolasi dalam sistem diskrit[66]. *Framework* dari SPN menyediakan sekumpulan blok untuk menentukan *state-transition* dan mekanisme penjadwalan kejadian dari sistem stokastik kejadian diskrit.

Pada penelitian ini menggunakan SPN untuk memodelkan kecepatan angin berdasarkan pengukuran kecepatan angin di Nganjuk. Penggunaan SPN dapat mengurangi jumlah *state* yang digunakan dan menggunakan probabilitas untuk

membangkitkan nilai kecepatan angin pada model yang dihasilkan. Tabel 3.1 menunjukkan perbandingan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya dan yang telah dilakukan pada penelitian ini.

Tabel 3. 1 Perbandingan Penelitian

No	Penelitian	Keterangan
1	D'Amico, Petroni, Prattico, "First and second order semi markov chain for wind speed modeling", Phys. A, Vol 392, 2013	<ul style="list-style-type: none"> Memodelkan kecepatan angin dengan semi markov. Pada <i>state</i> dan waktu <i>transition</i> menggunakan kernel orde dua Membutuhkan <i>state</i> yang cukup banyak Dimensi matrik yang besar
2	F. O. Hocaoglu, O. N. Gerek, and M. Kurban, "The Effect of Markov Chain State Size for Synthetic Wind Speed Generation," in <i>Proceedings of the 10th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, 2008. PMAPS '08</i> , 2008	<ul style="list-style-type: none"> Memodelkan kecepatan angin dengan markov chain Membandingkan dua model yaitu model dengan 13 <i>state</i> dan 26 <i>state</i> Model dengan jumlah <i>state</i> yang lebih banyak menghasilkan akurasi yang lebih tinggi
3	H. Aksoy, F. Z. Toprak, A. Aytek, and E. Unal, "Stochastic Generation of Hourly Mean Wind Speed Data," <i>Renew. Energy</i> , vol. 29, pp. 2111–2131, 2004	<ul style="list-style-type: none"> Membangkitkan data kecepatan angin menggunakan metode autoregressive, distribusi probabilitas weibull dan normal, markov chain dan wavelet Markov chain dengan distribusi probabilitas uniform paling sesuai untuk pembangkitan data kecepatan angin. Membutuhkan jumlah <i>state</i> yang cukup banyak
4	H. B. Azad, S. Mekhilef, and V. G. Ganapathy, "Long-Term Wind Speed Forecasting and General Pattern Recognition Using Neural Networks," <i>IEEE Trans. Sustain. Energy</i> , vol. 5, no. 2, pp. 546–553, Apr. 2014	<ul style="list-style-type: none"> Memprediksi kecepatan angin dan memodelkan kecepatan angin berdasarkan hasil prediksi menggunakan neural network. Membutuhkan memori yang cukup banyak
5	Ratna Ika Putri, Ardyono	<ul style="list-style-type: none"> Memodelkan kecepatan angin

	Priyadi, Mauridhi Hery Purnomo. <i>Stochastic Petri Nets For Very Short Term Wind Speed Modeling</i> . 2015 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Virtual Environment For Measurement System And Application (CIVEMSA), Shenzhen, China, 12-14 June 2015	menggunakan Stochastic Petri Net (SPN) <ul style="list-style-type: none"> • Model SPN hanya memiliki 8 <i>place</i> dan 7 <i>transition</i> • Marking pada SPN berdasarkan <i>continuous time markov chain</i> • <i>Transition</i> pada SPN merupakan fungsi dengan pembangkitan nilai acak uniform
--	--	--

3.1.1 Stokastik Petri Net

Petri nets ditemukan pertama kali oleh Dr. Carl Adam Petri pada tahun 1962. Petri nets menggabungkan teori matematika dan representasi secara grafik dari perilaku dinamik sistem. Petri Nets mengkombinasikan model *state –event* yang dinyatakan dalam grafik. Dalam Petri Nets terdapat 4 objek yaitu [64]

1. *Places* yang menyatakan suatu keadaan, yang dinyatakan dengan lingkaran
2. *Transition* yang menyatakan kejadian, yang dinyatakan dengan bar atau kotak.
3. *Directed arc* menunjukkan arah, menghubungkan *place* dengan *transition* atau *transition* ke *place*, yang dinyatakan dengan arah panah
4. Token menunjukkan ketersediaan data pada suatu *place*.

Suatu *place* terdiri dari *input place* yang menyatakan *state* awal atau masukan, dan *output place* menyatakan *state* hasil dari *transition*. Secara formal, petri nets dapat dinyatakan dengan

$$\text{PETRI} = \langle P_{pn}, T_{pn}, I_{pn}, O_{pn}, Mo \rangle \quad (3.1)$$

dimana

$P_{pn} = (P_1, P_2, P_3, \dots, P_{pn})$ merupakan himpunan *place* yang terbatas

$T_{pn} = (T_1, T_2, T_3, \dots, T_{pn})$ merupakan himpunan *transition* yang tertentu

$I_{pn} = T_{pn} \times P_{pn}$ merupakan matrik masukan yang menunjukkan arah dari *place* ke *transition*

$O_{pn} = T_{pn} \times P_{pn}$ merupakan matrik keluaran yang menunjukkan arah dari *transition* ke *place*.

Mo = merupakan *initial marking*

Eksekusi petri net dikontrol oleh jumlah dan distribusi token di dalam petri nets. Pergerakan atau perubahan distribusi token di dalam place menunjukkan kejadian atau eksekusi operasi. Petri nets dieksekusi melalui *firing transition*. Secara umum transition dibagi menjadi dua yaitu:

1. Transition tanpa input place disebut *source transition* yang dapat di *enable* tanpa kondisi tertentu. *Firing source transition* membutuhkan token tapi tidak menghasilkan token.
2. Transition tanpa *output place* disebut *sink transition*

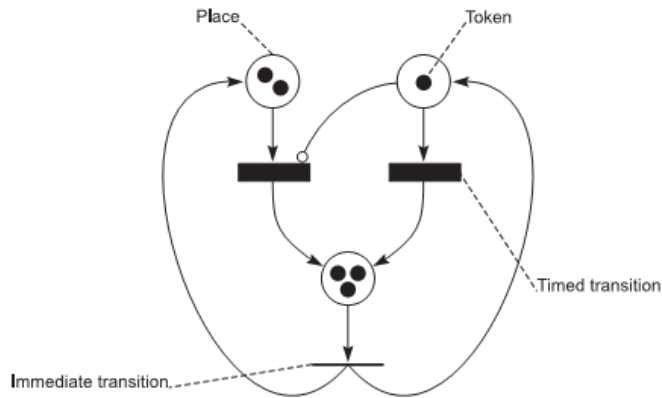
Aliran token terjadi karena

1. *Enabling Rule* : Suatu transition t dapat di *enable* jika tiap input place memiliki jumlah token paling sedikit sama dengan bobot arah yang menghubungkan p ke t untuk semua p di place.
2. *Firing Rule*: Transition hanya dapat di *enable* jika di *firing* yang akan memindahkan token pada tiap *place* masukan dan menyimpannya pada *place* keluaran.

Petri net telah dikembangkan menjadi beberapa jenis yaitu *colored petri net*, *time petri net* dan *stochastic petri net* (SPN). Stochastic Petri Nets (SPN) menyediakan pembentukan blok untuk mekanisme *state-transition* dan mekanisme penjadwalan kejadian dari sistem stokastik kejadian diskrit. SPN dispesifikasikan oleh sekumpulan *places* dan *transition* yang meliputi *normal input function*, *inhibitor input function* dan *output function* yang masing-masing tergabung dengan sekumpulan *place* dengan *transition* yang dapat dinyatakan dengan

$$SPN = \langle P_{pn}, T_{pn}, I_{pn}, O_{pn}, M_0, \Lambda \rangle \quad (3.2)$$

Dimana $\langle P_{pn}, T_{pn}, I_{pn}, O_{pn}, M_0 \rangle$ sama dengan petri net dan Λ merupakan suatu array dari kemungkinan *firing* yang tergabung dengan *transition*. *Firing* dari suatu *transition* merupakan operasi *atomic* dimana token dipindah dari *place* masukan dan disimpan ke *place* keluaran dengan satu operasi. *Firing delay* tergabung dengan setiap *transition* yang menunjukkan waktu sebelum *transition* dieksekusi. Marking dari SPN ditandai dari sejumlah token yang ditempatkan pada place. SPN memiliki representasi secara grafik yang dapat digunakan untuk pemodelan sistem kejadian diskrit, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.1



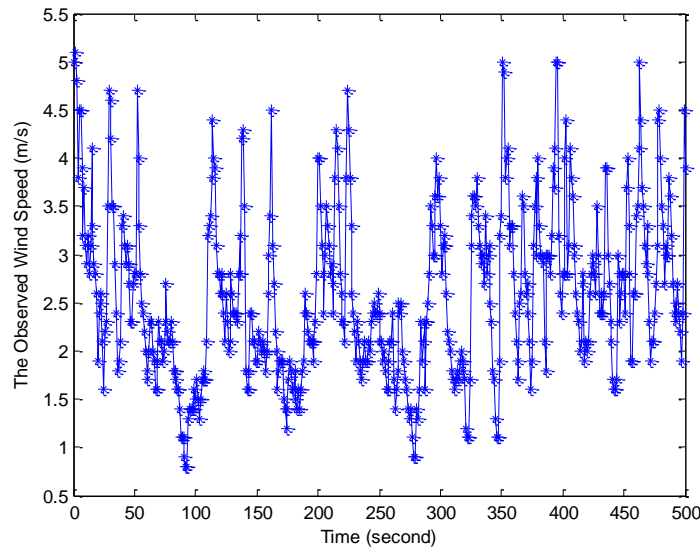
Gambar 3. 1 Pemodelan Dengan SPN

Waktu untuk mengaktifkan *transition* ditentukan oleh mekanisme stokastik. *Clock* digabungkan dengan masing-masing *transition*. Pembacaan *Clock* untuk mengaktifkan *transition* menunjukkan waktu hingga *transition* dijadwal untuk dieksekusi. *Clocks* berjalan pada kecepatan yang tergantung pada *marking* dan suatu perubahan terjadi ketika satu atau lebih *clock* turun menjadi “0”. Pada waktu “0” *initial marking* dan pembacaan *clock* dipilih berdasarkan distribusi probabilitas awal. Pada masing-masing perubahan marking terdapat tiga jenis *transition*.

1. *Transition* baru di *enable* dalam *marking* baru dan tidak di *enable* dalam *marking* sebelumnya sehingga tidak ada pembacaan *clock* yang digabung dengan *transition* sebelum perubahan *marking* atau di dalam sekumpulan *transition* yang memicu perubahan *marking*. Untuk setiap *transition*, suatu pembacaan *clock* baru dibangkitkan melalui distribusi probabilitas yang tergantung pada *marking* yang lama, *marking* baru dan kumpulan *transition* yang memicu perubahan *marking*.
2. *Transition* lama di *enable* pada kedua *marking* lama dan baru dan bukan pada sekumpulan *transition* yang memicu perubahan *marking*
3. *Disabled transition* yang terbaru di *enable* pada *marking* yang lama dan di *disable* pada *marking* yang baru. Jika *transition* bukan di dalam himpunan *transition* yang memicu perubahan *marking* maka akan dibatalkan dan pembacaan *clock* diabaikan.

3.1.2 Pemodelan Kecepatan Angin Dengan Stokastik Petri Net

Pemodelan kecepatan angin berdasarkan skala waktu dibagi menjadi empat kategori yaitu very short term, short term, medium term dan long term. Very short term memiliki jangkauan waktu antara beberapa detik hingga 30 menit ke depan, yang sangat berguna untuk *regulation action* and *electricity market clearing*. Model kecepatan angin berhubungan dengan proses stokastik untuk membangkitkan data kecepatan angin. Data angin yang digunakan pada paper berdasarkan hasil pengukuran kecepatan angin di kota Nganjuk. Data hasil pengukuran dimodelkan dengan stokastik petri net. Data hasil pengukuran seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.2.



Gambar 3. 2 Data Hasil Pengukuran Kecepatan Angin Di Nganjuk

Hasil pengukuran kecepatan angin memiliki jangkauan dari 0m/s hingga 6m/s yang dibagi dalam 6 kelompok dengan interval antara masing-masing kelas sebesar 1m/s[67], seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.2. Probabilitas untuk setiap kelas (P_i) dapat dinyatakan dengan persamaan

$$P_i = \frac{N_s}{N_T} \quad (3.3)$$

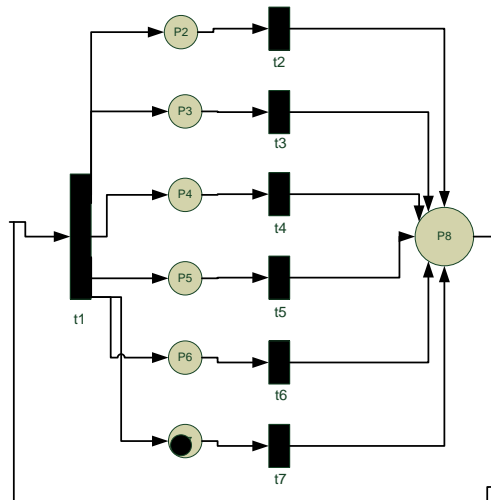
$$0 < P_i < 1 \quad (3.4)$$

$$\sum_{i=1}^6 P_i = 1 \quad (3.5)$$

Dimana N_s merupakan banyaknya kejadian kecepatan angin yang berada dalam kelas tersebut dan N_T merupakan total jumlah data kecepatan angin yang digunakan sebagai sampel. Probabilitas total untuk ke enam kelas sebesar 1 dan probabilitas untuk masing-masing kelas seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.2.

Tabel 3. 2 Probabilitas Kelas Kecepatan Angin

Kelas	Jangkauan	Probabilitas
1	0 – 1 m/s	0,0166
2	1 – 2 m/s	0,3156
3	2 – 3 m/s	0,4312
4	3 – 4 m/s	0,1595
5	4 – 5 m/s	0,0631
6	> 5 m/s	0,0133



Gambar 3. 3 Model SPN Untuk Kecepatan Angin

Pemodelan kecepatan angin dengan stochastic petri net ditunjukkan pada Gambar 3.3, yang terdiri dari $W = (P_{pn}, T_{pn}, I_{pn}, O_{pn}, Mo, h)$. Dimana $P_{pn} = (P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8)$ merupakan sekumpulan *place*; $T_{pn} = (T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7)$ merupakan sekumpulan *transition*; I_{pn} merupakan matriks masukan, O_{pn} merupakan matriks keluaran disusun berdasarkan perkalian dari kondisi *transition-place*; Mo merupakan *initial marking*; dan h merupakan probabilitas

dari kelas kecepatan angin yang berbeda. Penjelasan untuk masing-masing *place* dan *transition* seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.3.

Tabel 3. 3 Interpretasi *Place* dan *Transition*

Place	Interprestasi	Transition	Interprestasi
P2	Kecepatan angin dengan jangkauan 0 -1 m/s	T1	Membangkitkan nilai acak untuk penentuan kemunculan kelas
P3	Kecepatan angin dengan jangkauan 1 -2 m/s	T2	Membangkitkan nilai acak untuk range 0-1m/s
P4	Kecepatan angin dengan jangkauan 2 -3 m/s	T3	Membangkitkan nilai acak untuk range 1-2m/s
P5	Kecepatan angin dengan jangkauan 3 -4 m/s	T4	Membangkitkan nilai acak untuk range 2-3m/s
P6	Kecepatan angin dengan jangkauan 4 -5 m/s	T5	Membangkitkan nilai acak untuk range 3-4m/s
P7	Kecepatan angin dengan jangkauan >5 m/s	T6	Membangkitkan nilai acak untuk range 4-5m/s
P8	Kecepatan angin yang dihasilkan model	T7	Membangkitkan nilai acak untuk range >5m/s

Berdasarkan model SPN untuk kecepatan angin, matriks *incident* untuk I_{pn} dan O_{pn} dapat dinyatakan dengan

$$I_{pn} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

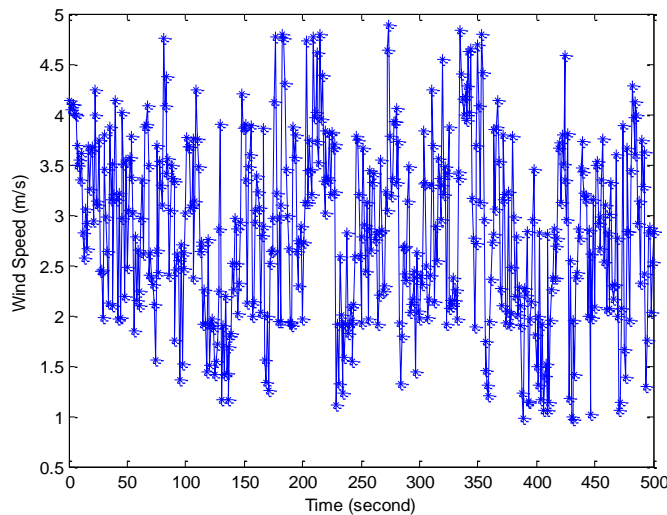
$$O_{pn} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Matriks *incident* untuk I_{pn} merupakan matrik yang menyatakan hubungan arah dari *place* ke *transition* dimana baris menyatakan *place* dan kolom menyatakan *transition*. Jika pada model arah panah menghubungkan *place* ke suatu *transition* maka matriks akan bernilai “1” sebaliknya akan bernilai “0”. Sedangkan O_{pn} merupakan matriks keluaran yang menyatakan hubungan arah dari *transition* ke *place*. Jika pada model arah panah menghubungkan *transition* ke suatu *place* maka matriks akan bernilai “1” sebaliknya akan bernilai “0”.

Initial marking (M_0) = [0 0 0 0 1 0 0], marking saat ini tergantung dari nilai marking sebelumnya dan matrik *incident* yang dinyatakan dengan

$$M_K = M_{K-1} - I_{pn}(P_{pn}, T_{pn}) + O_{pn}(T_{pn}, P_{pn}) \quad (3.8)$$

Marking pada SPN berdasarkan pada *continuous time markov chain*. *Transition* pada SPN ini merupakan fungsi untuk membangkitkan nilai acak dengan menggunakan fungsi uniform. Demikian pula penentuan kelas angin yang harus menghasilkan nilai kecepatan angin dibangkitkan dengan menggunakan nilai acak uniform. T1 akan membangkitkan nilai acak uniform untuk menentukan place P1 hingga P6 yang akan berisi token berdasarkan probabilitas kelas yang telah ditentukan. Jika P6 berisi token maka T7 akan di *enable* untuk membangkitkan nilai acak uniform. Place P7 akan berisi token yang merupakan nilai kecepatan angin yang dibangkitkan [67].



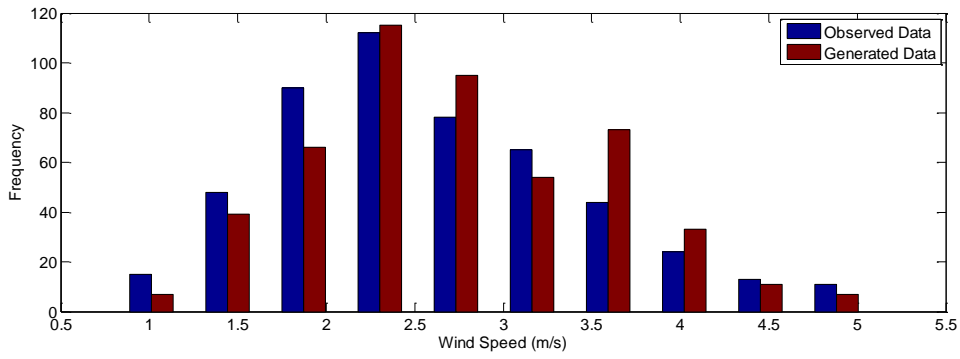
Gambar 3. 4 Model Kecepatan Angin Dengan SPN

Data yang dihasilkan dari model stokastik petri nets dibandingkan dengan data kecepatan angin hasil pengukuran di Nganjuk. Berdasarkan hasil simulasi, data kecepatan angin yang dihasilkan oleh stokastik petri nets memiliki nilai statistik yang mendekati sama dengan nilai hasil pengukuran yang dilakukan. Gambar 3.4 menunjukkan data yang dibangkitkan oleh stokastik petri nets. Standard deviasi pada data kecepatan angin yang dihasilkan SPN memiliki nilai yang sama dengan data hasil pengukuran yaitu sebesar 0,88, sedangkan nilai rata-rata data kecepatan angin SPN lebih besar dibandingkan data hasil pengukuran[67]. Tabel 3.3 menunjukkan perbandingan antara model kecepatan angin dengan SPN dan data hasil pengukuran.

Tabel 3. 4 Perbandingan Model dan Hasil Pengukuran Kecepatan Angin

	Data Pengukuran	Data Model
Minimum	0,8	0,9
Maximum	5,10	4,98
Mean	2,59	2,75
Standart Deviation	0,88	0,88

Model kecepatan angin dan data yang diamati memiliki perbedaan mean sebesar 0,16m/s dan memiliki standar deviasi yang sama. Berdasarkan [18], penggunaan model markov menghasilkan perbedaan rata-rata 0,09m/s dan perbedaan standar deviasi dari 0,09m/s. Namun, SPN dapat menghasilkan model kecepatan angin lebih sederhana dengan sejumlah *state* lebih sedikit dari markov model. Frekuensi (atau histogram) dari kecepatan angin yang dihasilkan juga dihitung dan dibandingkan dengan data yang diamati, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.5. Frekuensi tertinggi dalam mengamati data kecepatan angin dan data yang dihasilkan memiliki nilai-nilai dan kelas yang sama.



Gambar 3.5 Histogram dari Model Data Kecepatan Angin Dan Hasil Pengukuran

3.2 Pemodelan Turbin Angin

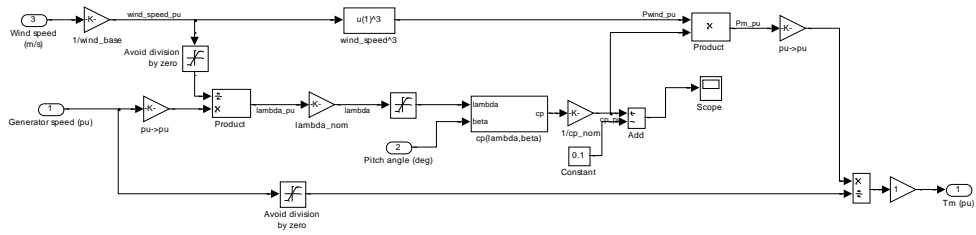
Turbin angin merupakan salah satu komponen penting didalam sistem konversi energi angin. Pemodelan turbin angin digunakan untuk desain dan pengembangan kontrol pada SKEA untuk mencapai performansi yang baik dan akurat[69-70]. Pemodelan dilakukan dengan menggunakan Matlab. Model turbin angin menyatakan hubungan antara masukan turbin angin berupa kecepatan angin dan torsi daya yang dihasilkan oleh turbin angin tersebut. Energi angin yang dihasilkan oleh kecepatan angin v (m/s) yang mengenai luasan sebesar A (m²) dapat dinyatakan dengan persamaan[68][71-72]

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (3.9)$$

Dimana ρ menyatakan kerapatan udara. Berdasarkan persamaan (3.9), energi angin yang dihasilkan sangat tergantung pada kecepatan angin dan merupakan pangkat tiga dari kecepatan angin. Daya keluaran atau torsi dari turbin angin ditentukan oleh beberapa faktor antara lain kecepatan turbin, blade rotor, *pitch angle*, ukuran dan bentuk turbin, luasan turbin dan kecepatan angin[46]. Menurut Thongam dkk [73], daya yang dihasilkan oleh turbin angin dapat dinyatakan dengan persamaan

$$P_m = 0,5\pi\rho C_p(\lambda,\beta)R^2v^3 \quad (3.10)$$

Dimana C_p merupakan koefisien konversi daya turbin, λ merupakan *tip speed ratio*, β merupakan *pitch angle*, R merupakan radius turbin dan v merupakan kecepatan angin. Pemodelan turbin angin dilakukan dengan menggunakan Power Sim Simulink Matlab, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.6



Gambar 3. 6 Pemodelan Turbin Angin Dengan Simulink

Koefisien konversi daya turbin (C_p) dapat dinyatakan dengan persamaan [3][68]

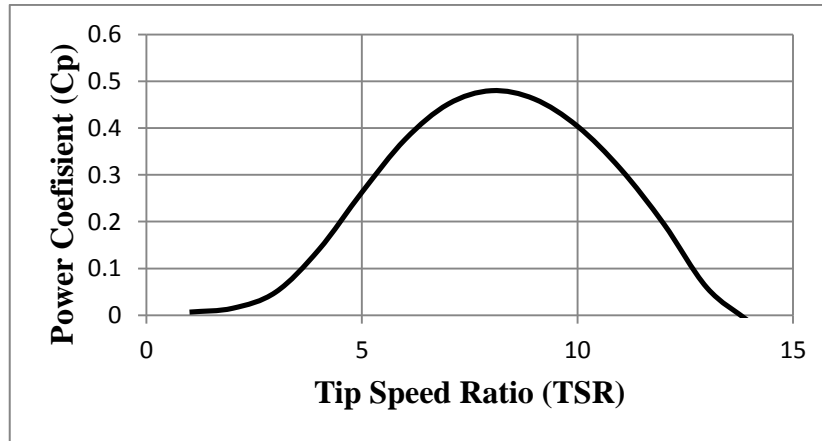
$$C_p = 0.5176 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\frac{21}{\lambda_i}} + 0.0068\lambda \quad (3.11)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (3.12)$$

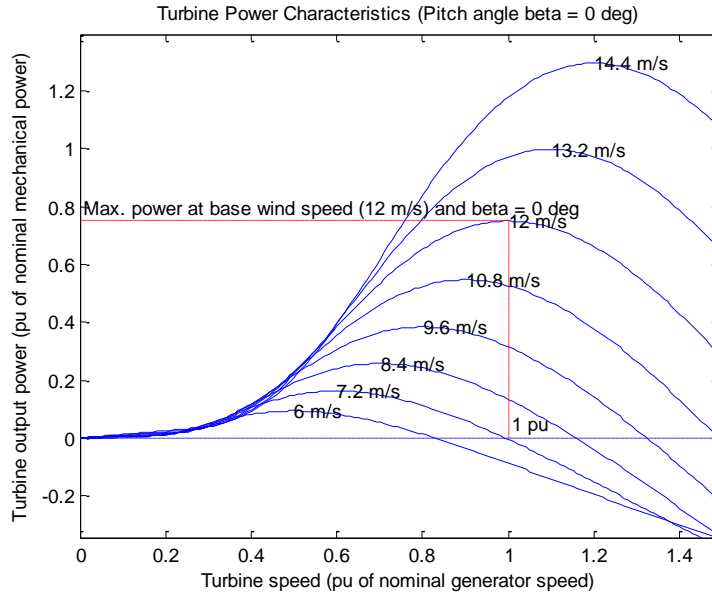
Tip speed ratio (λ) merupakan perbandingan antara kecepatan angular turbin dan kecepatan angin yang dapat dinyatakan dengan persamaan

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{v} \quad (3.13)$$

dimana ω_r merupakan kecepatan angular turbin. Hubungan antara TSR dengan koefisien daya seperti ditunjukkan pada Gambar 3.7. Berdasarkan persamaan 3.11 dan 3.12, pada *pitch angle* sebesar 0° dan kecepatan angin tertentu, turbin angin akan mencapai koefisien daya maksimal sebesar 0,48 pada nilai TSR sebesar 8.



Gambar 3. 7 Hubungan Antara TSR dan Koefisien Daya (C_p)



Gambar 3. 8 Karakteristik Turbin Angin[68]

Gambar 3.8 menunjukkan daya keluaran mekanik turbin angin terhadap kecepatan turbin dengan kecepatan angin yang berbeda dan *pitch angle* 0° . Pada setiap kecepatan angin yang berbeda maka turbin angin akan menghasilkan titik daya maksimal yang berbeda pula. Berdasarkan persamaan 3.10 hingga 3.13 dapat ditentukan torsi mekanik turbin yaitu

$$T_m = 0.5 \rho A \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda} v^2 \quad (3.14)$$

Persamaan dinamik untuk turbin angin dapat dinyatakan dengan

$$\frac{d\omega_r}{dt} = (1/J)[T_m - T_L - F\omega_r] \quad (3.15)$$

Dimana J merupakan momen inersia, F merupakan koefisien gesek, T_m merupakan torsi yang dihasilkan turbin dan T_L merupakan torsi generator yang terhubung dengan turbin. Daya mekanik turbin angin dapat dinyatakan dengan persamaan

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \pi R^5 \frac{\omega_r^3}{\lambda^3} C_p \quad (3.16)$$

3.3 Pemodelan *Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)*

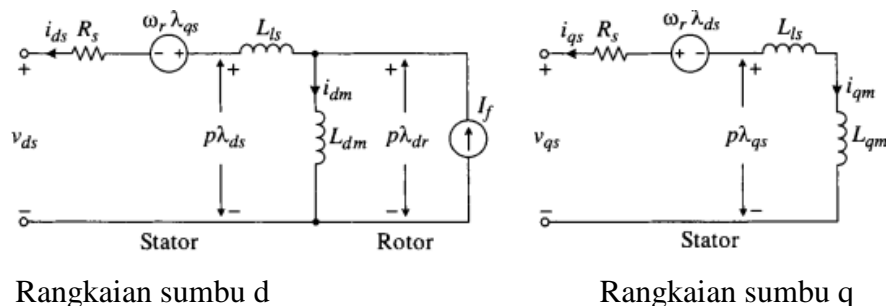
Sistem konversi energi angin membutuhkan generator untuk mengkonversi daya mekanik menjadi energi listrik. Salah satu jenis generator yang banyak digunakan yaitu *permanent magnet synchronous generator (PMSG)*

yang merupakan mesin sinkron regular dimana rangkaian eksitasi DC digantikan dengan magnet permanen untuk menghilangkan *brush*. PMSG memiliki keuntungan yaitu

1. Tanpa *brush* dan slip ring, PMSG memiliki ukuran fisik yang kecil dan momen inersia yang kecil [74]
2. struktur yang sederhana dan efisiensi yang tinggi.
3. Dalam PMSG, fluks magnetik rotor dihasilkan oleh permanent magnet dan PMSG tidak memiliki belitan rotor maka dapat menghasilkan kerapatan daya yang tinggi sehingga dapat mengurangi ukuran dan berat dari generator.
4. Tidak memerlukan eksitasi eksternal, tidak terdapat rugi-rugi tembaga pada rangkaian rotor, dan biaya perawatan rendah[11]
5. Reliabilitas lebih baik dan performansi tinggi [12]
6. Jika terdapat gangguan pada grid tidak berpengaruh secara langsung pada generator karena amplitudo dan frekuensi tegangan generator dapat dikontrol penuh oleh konverter daya [9]

Namun demikian PMSG juga memiliki kekurangan yaitu:

1. Biaya bahan permanent magnet mahal
2. Sulit untuk difabrikasi
3. Demagnetisasi permanent magnet membutuhkan suhu tinggi
4. Tergantung dari rangkaian konverter daya karena semua daya yang dihasilkan harus melalui konverter daya.
5. Rugi-rugi daya di rangkaian elektronika daya tinggi [6].



Gambar 3. 9 Rangkaian Ekuivalen PMSG

Model dinamik PMSG dapat dinyatakan dengan menggunakan rangkaian ekuivalen dq seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.9. Pada model rangkaian rotor, arus medan dalam belitan rotor dinyatakan sebagai sumber arus konstan (I_f) dalam rangkaian sumbu d. Berdasarkan rangkaian tersebut persamaan tegangan untuk generator sinkron dapat dinyatakan dengan [3][68-69][74-75]

$$v_{ds} = -i_{ds}.R_s - \omega_r.\lambda_{qs} + p.\lambda_{ds} \quad (3.17)$$

$$v_{qs} = -i_{qs}.R_s + \omega_r.\lambda_{ds} + p.\lambda_{qs} \quad (3.18)$$

Dimana i_d adalah arus stator sumbu d, i_q adalah arus stator sumbu q, v_d adalah tegangan stator pada sumbu d, v_q adalah tegangan stator pada sumbu q, R_s adalah resistansi belitan (Ω), L_d merupakan induktansi belitan pada sumbu d (H), L_q adalah induktansi belitan pada sumbu q(H), p merupakan jumlah pole dan ω_r adalah kecepatan rotasi elektrik PMSG (rad/s). λ_{qs} dan λ_{ds} merupakan flux stator sumbu d dan q yang dapat dinyatakan dengan

$$\begin{aligned} \lambda_{qs} &= -i_{qs}.L_{ls} + L_{qm}.i_{qs} \\ &= -L_q.i_{qs} \end{aligned} \quad (3.19)$$

$$\begin{aligned} \lambda_{ds} &= -i_{ds}.L_{ls} + L_{dm}.(i_f - i_{ds}) \\ &= -L_d.i_{ds} + \lambda_r \end{aligned} \quad (3.20)$$

Dimana λ_r merupakan fluks rotor, L_d dan L_q merupakan induktansi diri stator sumbu dq dan L_{qm} dan L_{dm} merupakan induktansi magnet sumbu dq.

$$L_q = (L_{ls} + L_{qm}) \quad (3.21)$$

$$L_d = (L_{ls} + L_{dm}) \quad (3.22)$$

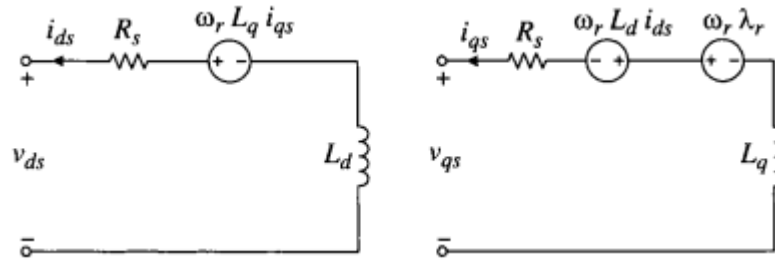
$$\lambda_r = L_{dm}.I_f \quad (3.23)$$

Berdasarkan persamaan 3.19 dan 3.20 dan $d\lambda_r/dt = 0$ maka persamaan tegangan stator sumbu dq dapat dinyatakan

$$v_{ds} = -i_{ds}.R_s + \omega_r.L_q.i_{qs} - p.L_d.i_{ds} \quad (3.24)$$

$$v_{qs} = -i_{qs}.R_s - \omega_r.L_d.i_{ds} + \omega_r.\lambda_r - p.L_q.i_{qs} \quad (3.25)$$

Berdasarkan persamaan 3.24 dan 3.25 maka model dinamik PMSG dapat disederhanakan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.10.



a) Rangkaian sumbu d

b) Rangkaian sumbu q

Gambar 3. 10 Model Sederhana PMSG Dalam Sumbu dq

Torsi elektromagnetik yang dihasilkan oleh PMSG dapat dihitung dengan menggunakan persamaan

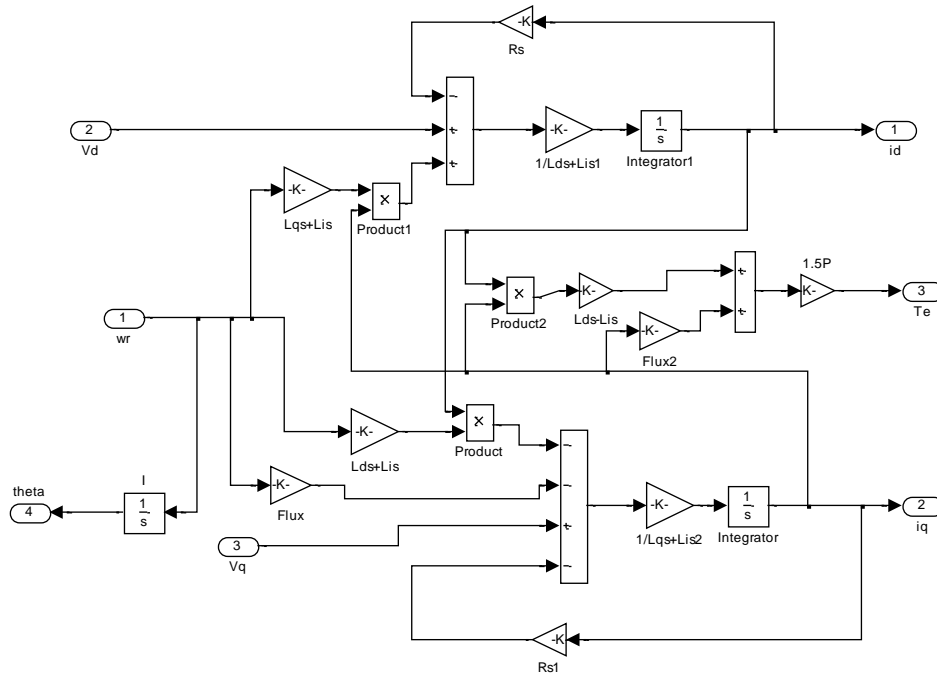
$$\begin{aligned} T_e &= \frac{3P}{2} (i_{qs} \lambda_{ds} - i_{ds} \lambda_{qs}) \\ &= \frac{3P}{2} (i_{qs} \lambda_r + i_{ds} i_{qs} (L_d + L_q)) \end{aligned} \quad (3.26)$$

Kecepatan rotor PMSG dapat ditentukan dengan persamaan

$$\omega_r = \frac{P}{J_s} (T_e - T_m) \quad (3.27)$$

Daya elektrik (P) yang dihasilkan dapat dinyatakan dengan persamaan

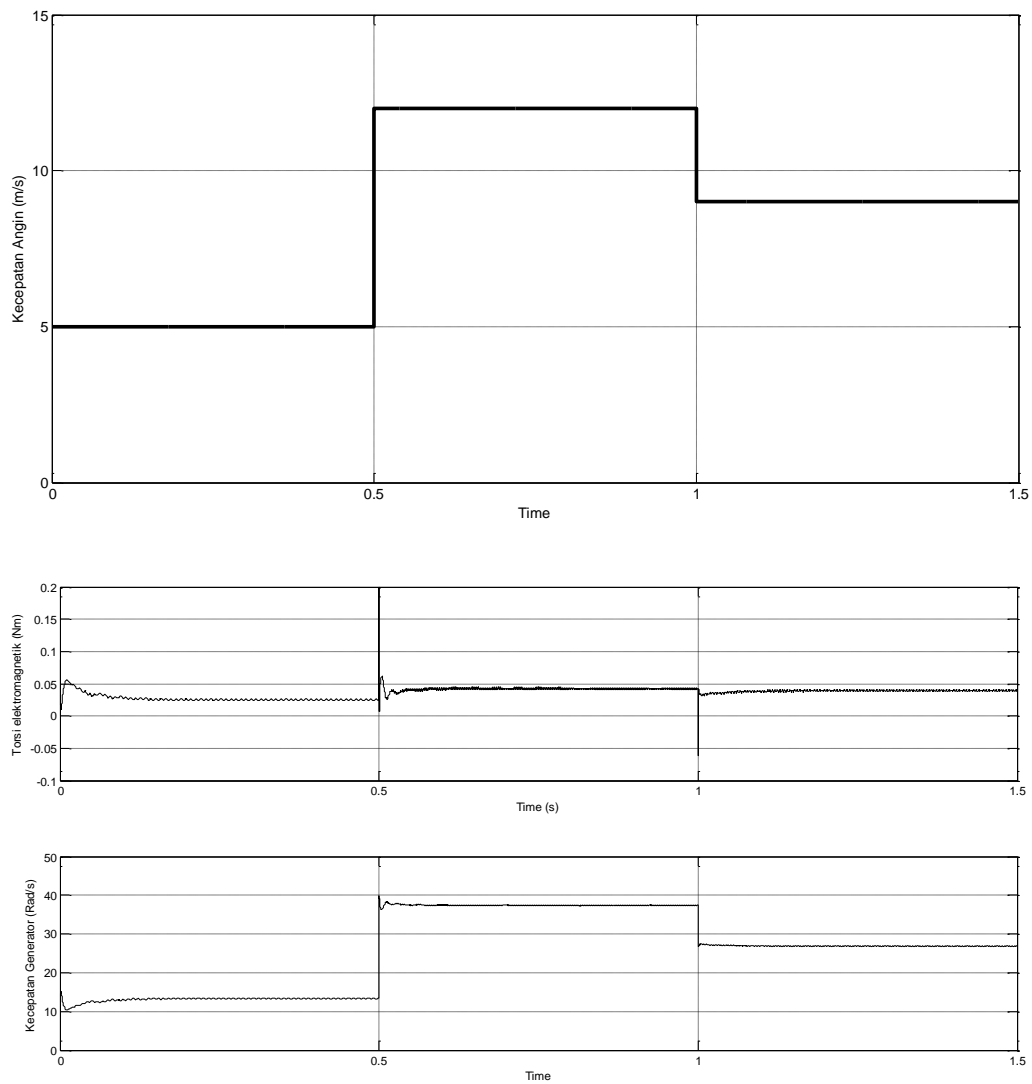
$$P = 1,5(v_{sd} \cdot i_{sd} + v_{sq} \cdot i_{sq}) \quad (3.28)$$



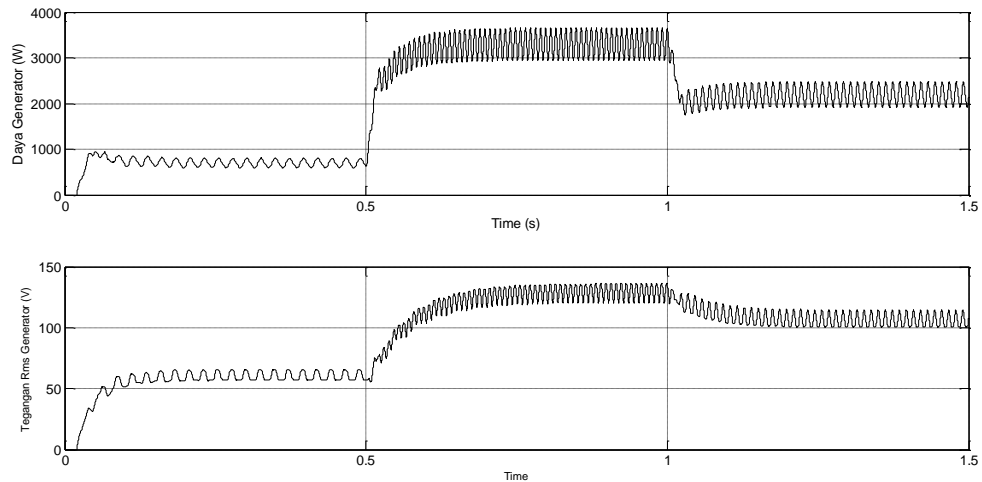
Gambar 3. 11 Model PMSG Menggunakan Matlab

Pemodelan PMSG dengan menggunakan MATLAB seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.11. Nilai parameter untuk PMSG yang digunakan pada disertasi ini yaitu[68] :

Resistansi stator (R_s)	= $0,425\Omega$
Induktasi (L_d)	= $8,2 \text{ mH}$
Induktasi (L_q)	= $8,2 \text{ mH}$
Flux	= $0,433\text{V.s}$
Inersia	= $0,01197 \text{ Kgm}^2$
Faktor gesekan	= $0,001189 \text{ Nms}$
Pasangan pole	= 10



Gambar 3. 12 Hasil Simulasi Kecepatan Generator dan Torsi PMSG



Gambar 3. 13 Hasil Simulasi Daya dan Tegangan PMSG

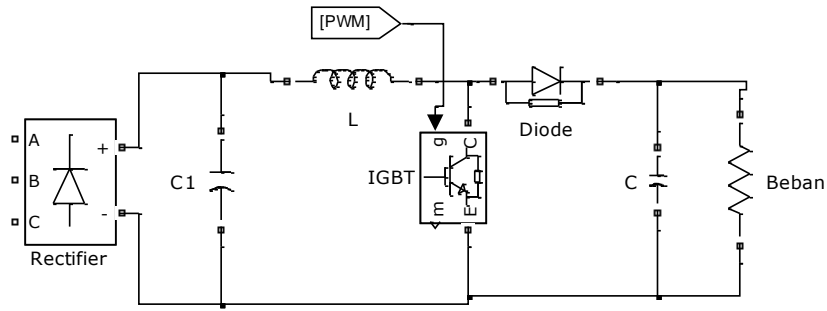
Kecepatan generator tergantung pada kecepatan angin yang ditangkap oleh turbin angin. Semakin besar kecepatan angin akan menghasilkan energi yang semakin besar pula sehingga torsi dan kecepatan generator yang dihasilkan juga akan semakin besar, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.12. Pada kecepatan angin 5m/s, kecepatan generator mencapai 13rad/s dan peningkatan kecepatan angin menjadi 12m/s akan menghasilkan kenaikan kecepatan generator menjadi 38rad/s. Perubahan kecepatan generator akan menghasilkan perubahan daya dan tegangan yang dihasilkan oleh PMSG pula seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.13. Semakin tinggi kecepatan yang dihasilkan daya dan tegangan yang dihasilkan juga akan semakin besar.

3.4 Pemodelan konverter Daya

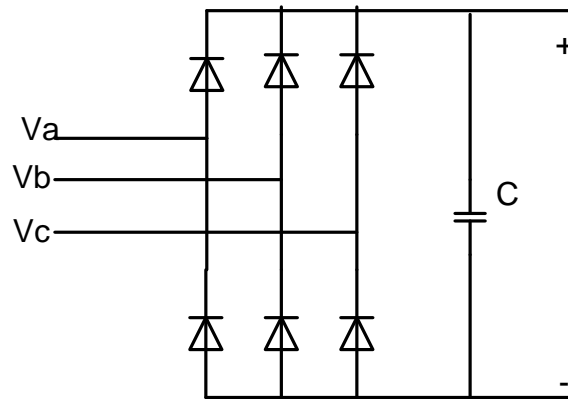
Konverter daya yang digunakan pada penelitian ini adalah konverter daya *full scale* karena sederhana, efisien dan mudah dalam pengaturan. Konverter daya *full scale* yang digunakan terdiri dari konverter sisi rotor dan konverter sisi grid. Konverter sisi rotor terdiri dari penyearah dioda 3 fasa dan konverter boost sedangkan konverter sisi grid merupakan *voltage source inverter* (VSI). Pemodelan menggunakan Simulink powersim blok pada Matlab.

3.4.1 Konverter Sisi Rotor

Gambar 3.14 menunjukkan pemodelan konverter sisi rotor yang terdiri dari penyearah dioda tiga fasa dan konverter boost. Penyearah dioda tiga fasa mendapat masukan 3 fasa dari PMSG dan keluaran penyearah terhubung dengan filter kapasitor yang selanjutnya akan terhubung dengan konverter boost



Gambar 3. 14 Pemodelan Konverter Sisi Rotor Dengan Simulink



Gambar 3. 15 Rangkaian Penyearah Dioda Tiga Fasa

Penyearah dioda tiga fasa terdiri dari enam dioda yang terbagi pada tiga lengan dimana masing-masing lengan terdiri dua dioda, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.15. Pada setiap lengan, dioda akan berkerja *on* dan *off* secara bergantian. Sudut konduksi untuk setiap dioda adalah $2\pi/3$ sehingga tegangan keluaran rata-rata yang dihasilkan penyearah ini (V_{dc}) dapat dinyatakan dengan

$$V_{dc} = \frac{6}{2\pi} \int_{\pi/3}^{2\pi/3} \sqrt{3}V_m \sin(\omega t) d(\omega t) \quad (3.29)$$

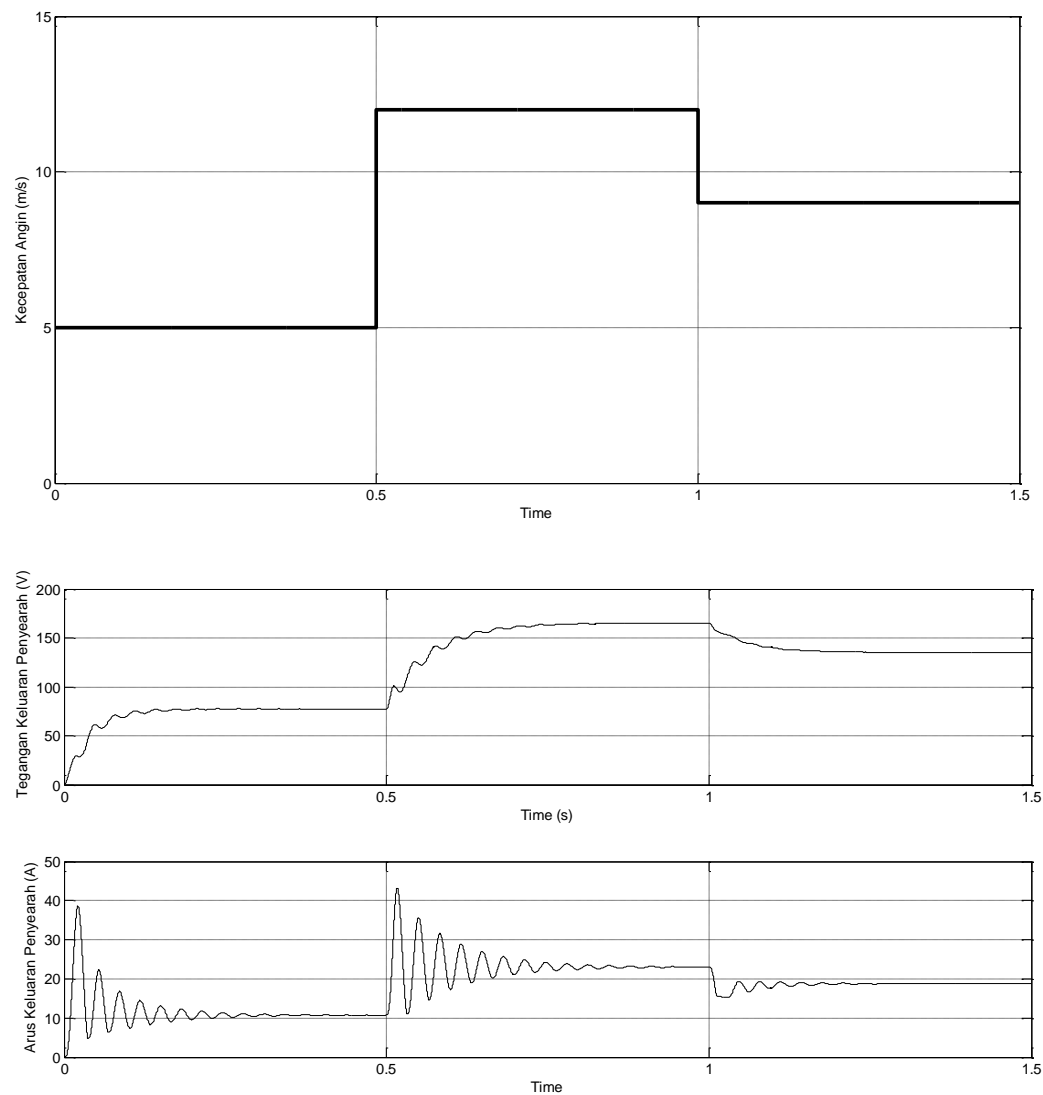
$$\text{Atau } V_{dc} = V_m \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \quad (3.30)$$

Dimana V_m merupakan tegangan masukan maksimum. Pada penelitian ini, tegangan masukan dari rangkaian penyearah berasal dari tegangan keluaran PMSG. Tegangan keluaran per fasa untuk PMSG (V_{ph}) dapat dinyatakan dengan [76][13]

$$V_{ph} = E_g - I_g (R_s + j\omega L_s) \quad (3.31)$$

Dimana E_g merupakan daya elektromotif PMSG dan I_g merupakan arus fasa PMSG. Pada PMSG, daya elektromotif yang dihasilkan sebanding dengan tegangan keluaran penyearah atau tegangan sisi DC. Seperti diketahui tegangan maksimum (V_m) merupakan $\sqrt{2} V_{ph}$, sehingga dengan menggunakan persamaan 3.30 dan 3.31 maka tegangan keluaran penyearah dapat dinyatakan dengan

$$\begin{aligned} V_{dc} &= \frac{3\sqrt{6}}{\pi} V_{ph} \\ &= \frac{3\sqrt{6}}{\pi} (E_g - I_g (R_s + j\omega L_s)) \end{aligned} \quad (3.32)$$



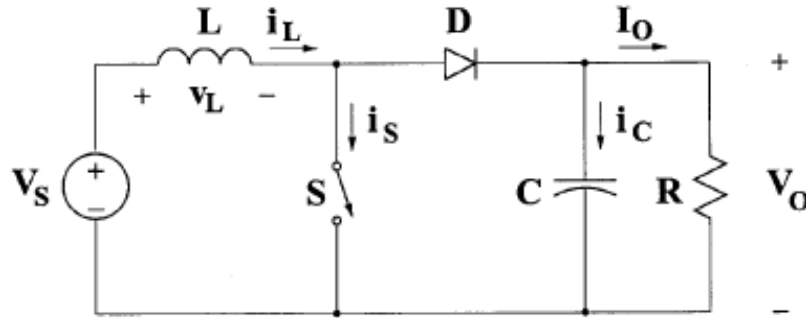
Gambar 3.16 Hasil Simulasi Tegangan dan Arus Keluaran Penyearah Pada Matlab

Tegangan keluaran rata-rata yang dihasilkan penyearah sebanding dengan tegangan keluaran generator. Semakin besar kecepatan angin, daya PMSG semakin besar sehingga keluaran penyearah juga semakin pula, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.16. Konverter boost terdiri dari komponen induktor, kapasitor, dioda dan *insulated gated bipolar transistor* (IGBT) yang berfungsi sebagai saklar, seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.17. Konverter boost berfungsi untuk menghasilkan tegangan searah yang lebih besar dibandingkan tegangan masukannya. Ketika saklar IGBT tertutup, arus pada induktor *boost* akan naik secara linier dan dioda D off pada waktu tersebut.

Sedangkan pada saat IGBT off , dioda akan aktif dan induktor akan *discharged* sehingga energi yang tersimpan mengalir melalui dioda ke beban. Pengaktifan IGBT tergantung pada *duty cycle* pulsa PWM yang diberikan, dimana *duty cycle* (D) dapat dinyatakan dengan

$$D = \frac{T_{on}}{T_s} \quad (3.33)$$

Dimana T_{on} merupakan waktu pulsa *on* dan T_s merupakan periode *switching*.



Gambar 3. 17 Rangkaian Konverter Boost

Tegangan induktor dalam satu periode (T_s) akan sama dengan 0 dan ditentukan oleh *duty cycle* yang dapat dinyatakan dengan persamaan [13][57][76]

$$D \cdot V_{dc} + (1-D)(V_{dc} - V_{out}) = 0 \quad (3.34)$$

Dimana V_{out} merupakan tegangan keluaran konverter boost dan V_{dc} merupakan tegangan masukan konverter boost yang merupakan tegangan keluaran *rectifier*.

Hubungan antara tegangan masukan dan keluaran dapat dinyatakan dengan

$$V_{out} = \frac{V_{dc}}{1-D} \quad (3.35)$$

Daya keluaran yang dikirim ke beban dapat dinyatakan dengan

$$\begin{aligned} P_{out} &= V_{out} \cdot I_o \\ &= \frac{V_{out}^2}{R_L} \end{aligned} \quad (3.36)$$

Dimana I_o merupakan arus keluaran konverter dan R_L merupakan beban.

Berdasarkan persamaan 3.35 dan 3.36 dapat dinyatakan

$$P_{out} = \frac{V_{dc}^2}{(1-D)^2 R_L} \quad (3.37)$$

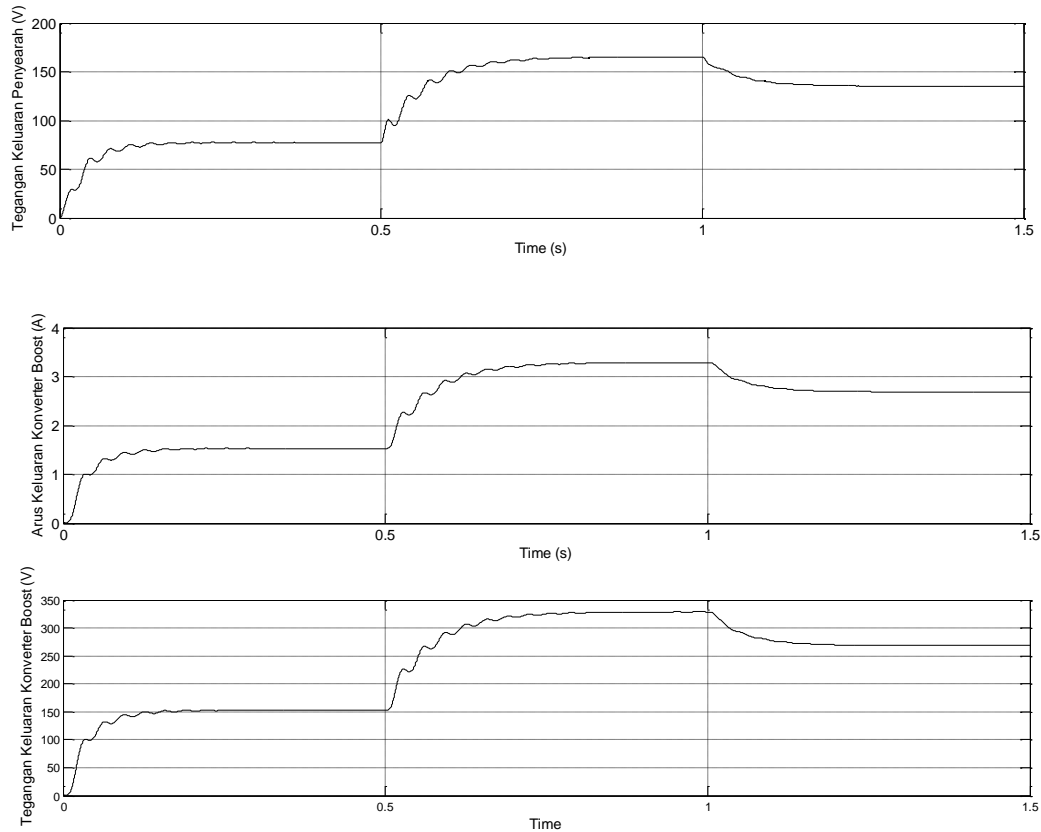
Bila rugi-rugi daya pada konverter sangat kecil dan diabaikan maka daya keluaran akan sama dengan daya masukan sehingga.

$$P_{in} = \frac{V_{dc}^2}{R_{in}} \cong P_{out} = \frac{V_{dc}^2}{(1-D)^2 R_L} \quad (3.38)$$

Oleh karena itu resistansi masukan konverter boost (R_{in}) dapat dinyatakan dengan

$$R_{in} \approx (1-D)^2 R_L \quad (3.39)$$

Berdasarkan persamaan 3.39, penurunan *duty cycle* menghasilkan kenaikan resistansi masukan pada konverter boost sehingga arus masukan konverter akan menurun demikian pula pada arus keluaran dan torsi elektromagnetik PMSG. Penurunan torsi elektromagnetik akan meningkatkan kecepatan rotor PMSG. Oleh karena itu kecepatan rotor PMSG dapat diatur untuk mendapatkan daya maksimum melalui pengaturan *duty cycle* yang ditentukan oleh kontroler MPPT.



Gambar 3. 18 Hasil Simulasi Tegangan dan Arus Keluaran Konverter Boost

Gambar 3.18 menunjukkan hasil simulasi tegangan dan arus keluaran konverter boost pada Matlab. Dibandingkan tegangan keluaran penyearah pada Gambar 3.16, tegangan keluaran yang dihasilkan oleh konverter boost lebih besar.

Tegangan dan arus yang dihasilkan sebanding dengan tegangan keluaran penyearah yang diterima oleh konverter boost.

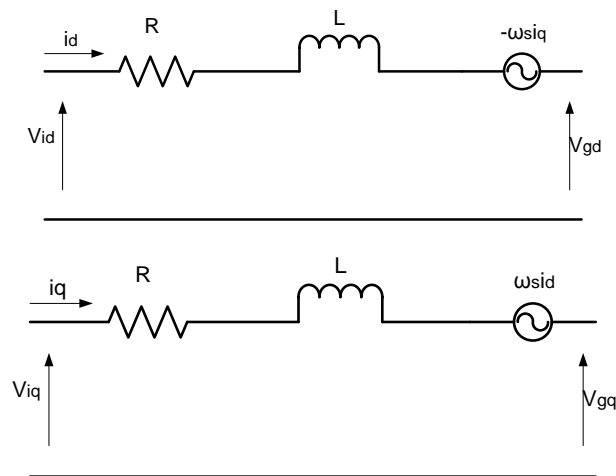
3.4.2 Grid Side Converter

Grid side converter (GSC) menggunakan VSI yang menghubungkan antara DC link dengan grid melalui rangkaian filter. VSI berfungsi untuk mengkonversi tegangan DC menjadi tegangan AC. Seperti halnya pada penyearah dioda, VSI memiliki tiga lengan yang masing-masing lengan memiliki 2 komponen IGBT yang berfungsi sebagai saklar (*switch*). IGBT telah digunakan secara luas pada aplikasi elektronika daya menengah karena dapat dengan mudah diatur pada frekuensi tinggi dengan memberikan tegangan kecil pada gate. Untuk setiap lengan, hanya satu saklar yang akan konduksi pada waktu yang bersamaan. Lamanya suatu saklar akan aktif dalam satu periode *switching* ditentukan oleh *duty cycle*.

Pemodelan GSC dalam sumbu dq ditentukan dengan menggunakan transformasi clark dan park. Transformasi clark dan park digunakan untuk mengubah representasi variabel tiga fasa v_a , v_b , dan v_c menjadi dua variabel sumbu d dan q dalam sebuah bingkai referensi yang berotasi sinkron. Persamaan clark dan park dapat dinyatakan dengan persamaan

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \quad (3.41)$$



Gambar 3. 19 Rangkaian Ekivalen GSC dalam Model dq

Gambar 3.19 menunjukkan rangkaian ekivalen GSC dalam bentuk model rangkaian model dq. Berdasarkan rangkaian model dq, secara matematis GSC dapat dinyatakan dengan persamaan [77-78]

$$V_{di} = V_{dg} + L \frac{di_d}{dt} + Ri_d - (\omega_s Li_q) \quad (3.42)$$

$$V_{qi} = V_{qg} + L \frac{di_q}{dt} + Ri_q + (\omega_s Li_d) \quad (3.43)$$

Dimana ω_s merupakan frekuensi grid, V_{dg} dan V_{qg} merupakan tegangan grid dalam sumbu dq, V_{di} , V_{qi} , i_d , i_q merupakan tegangan dan arus inverter dalam sumbu dq. L dan R merupakan induktansi dan resistansi filter. Dalam bentuk persamaan differensial, persamaan diatas dapat dinyatakan dengan

$$\frac{di_d}{dt} = -\frac{R}{L}i_d + \frac{1}{L}v_{di} + \frac{1}{L}(-v_{dg} + \omega_s Li_q) \quad (3.44)$$

$$\frac{di_q}{dt} = -\frac{R}{L}i_q + \frac{1}{L}v_{qi} + \frac{1}{L}(-v_{qg} - \omega_s Li_d) \quad (3.45)$$

Daya aktif dan reaktif pada jaringan listrik dapat dinyatakan dengan persamaan dq [78]

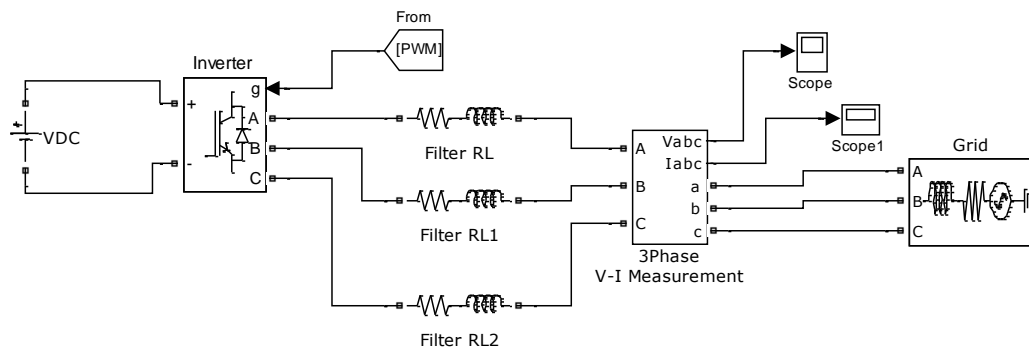
$$P = \frac{3}{2}(V_{dg}I_d + V_{qg}I_q) \quad (3.44)$$

$$Q = \frac{3}{2}(V_{qg}I_d + V_{dg}I_q) \quad (3.45)$$

Jika bingkai referensi $v_q = 0$ maka persamaan daya aktif dan reaktif dapat dinyatakan dengan

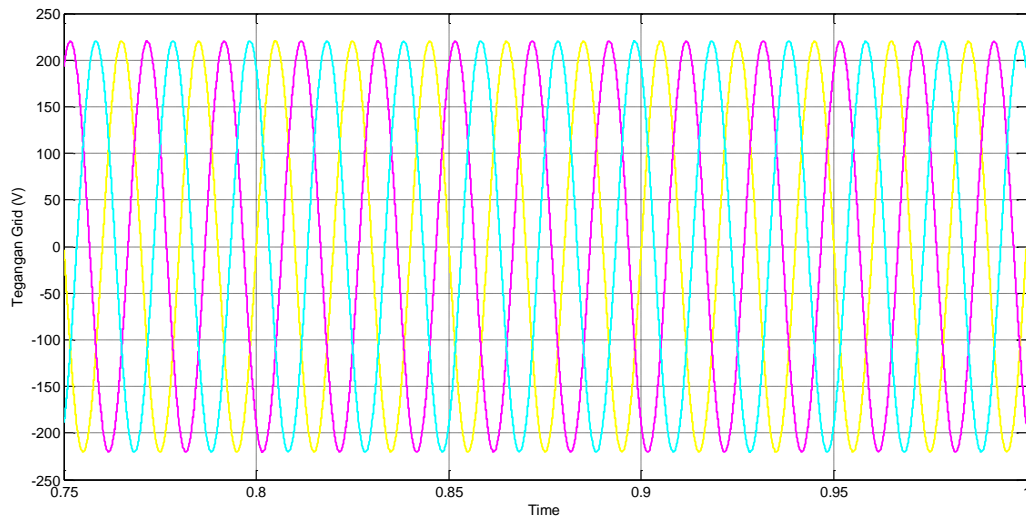
$$P = \frac{3}{2}V_{dg}I_d \quad (3.46)$$

$$Q = \frac{3}{2}V_{dg}I_q \quad (3.47)$$



Gambar 3. 20 Model Konverter Sisi Grid Pada Matlab

Model konverter yang terhubung dengan grid tiga fasa melalui filter LR ditunjukkan pada Gambar 3.20 dengan menggunakan Simpower system pada Matlab. Blok inverter merupakan rangkaian jembatan IGBT tiga fasa. Sinyal PWM untuk mengaktifkan IGBT pada inverter dihasilkan oleh kontrol sisi grid berdasarkan arus grid, tegangan grid dan tegangan DC referensi yang diinginkan. Gambar 3.21 menunjukkan tegangan grid tiga fasa yang dihasilkan dengan menggunakan rangkaian GSC. Tegangan tiga fasa yang dihasilkan memiliki perbedaan 120° untuk setiap fasa R, S dan T.



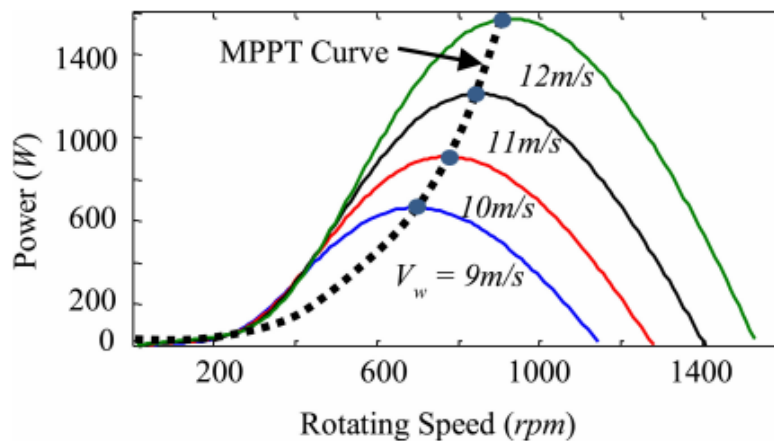
Gambar 3. 21 Hasil Simulasi Tegangan Grid

BAB 4

OPTIMASI EKSTRAKSI DAYA MAKSIMUM PADA PMSG TURBIN ANGIN

Pada bab ini akan dibahas mengenai optimasi ekstraksi daya maksimum pada dua sistem turbin angin yaitu turbin angin yang terhubung ke grid dan terhubung ke beban dengan menggunakan metode kecerdasan buatan. Beberapa strategi untuk ekstraksi daya maksimum dengan menggunakan kecerdasan buatan akan dijelaskan pada bab ini. Algoritma ini digunakan untuk mengontrol sistem turbin angin sehingga dapat menghasilkan daya maksimum. Oleh karena itu disebut juga dengan *maximum power point tracking* (MPPT). Kontroler MPPT akan beroperasi jika turbin angin berada pada daerah 2 yaitu kecepatan angin diantara kecepatan angin *cut-in* ($v_{cut\ in}$) dan kecepatan angin rata-rata (v_{rated}). Algoritma MPPT pada SKEA yang terhubung ke grid atau beban disimulasikan menggunakan Matlab menggunakan pemodelan SKEA yang telah dibahas pada bab sebelumnya.

4.1 Ekstraksi Daya Maksimum Pada SKEA



Gambar 4. 1 Kurva MPPT Berdasarkan Hubungan Kecepatan Rotor dan Daya Generator [80]

Efisiensi konversi energi angin sangat dipengaruhi oleh karakteristik turbin angin yang bersifat non linier dan tergantung pada kecepatan angin. Supaya konversi energi angin dapat optimum maka sistem harus beroperasi pada

titik daya maksimum (MPP). Perubahan kecepatan angin dan karakteristik turbin akan menggeser MPP, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.1. Walaupun kecepatan angin bervariasi, turbin angin harus tetap dapat mengekstrak energi angin secara maksimal. Sehingga diperlukan *maximum power point tracking* (MPPT) yang berfungsi untuk mencari titik daya maksimum (MPP) dan mempertahankan sistem konversi energi angin tetap menghasilkan daya optimum walaupun terjadi perubahan kecepatan angin. Pada kecepatan angin tertentu, daya maksimum akan didapatkan jika generator berputar pada kecepatan tertentu pula. Oleh karena itu, MPPT pada sistem *variable speed wind turbine* (VSWT) dilakukan dengan mengubah kecepatan rotasi generator terhadap setiap perubahan kecepatan angin sehingga daya yang dihasilkan akan maksimum. Daya optimum dari turbin angin dapat dinyatakan dengan persamaan [81-82]

$$P_{m-opt} = K_{opt} \omega_{ropt}^3 \quad (4.1)$$

Dimana

$$K_{opt} = \frac{0,5\pi\rho C_{pmax} R^5}{\lambda_{opt}^3} \quad (4.2)$$

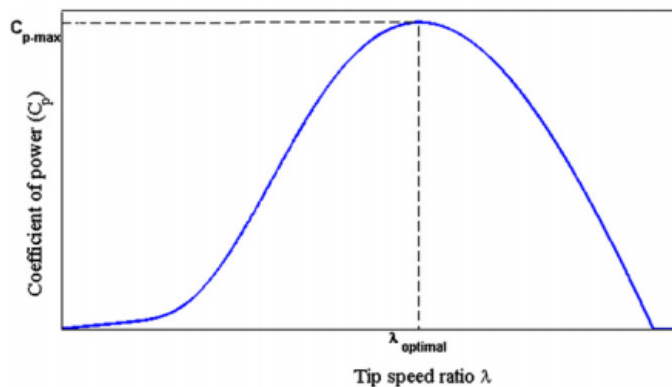
$$\omega_{ropt} = \frac{\lambda_{opt} vw}{R} \quad (4.3)$$

Hubungan antara daya dan torsi turbin dapat dinyatakan dengan

$$P_m = T_m \omega_r \quad (4.4)$$

Berdasarkan persamaan 4.1 hingga 4.4 maka dapat ditentukan torsi optimal yaitu

$$T_{m-opt} = \frac{1}{2} \rho \pi R^5 \frac{\omega_r^2}{\lambda_{opt}^3} C_p \quad (4.5)$$



Gambar 4. 2 Karakteristik Koefisien Daya Sebagai Fungsi TSR

Penerapan MPPT pada SKEA membutuhkan konverter daya. Pengaturan PMSG untuk mencapai MPP dapat dilakukan dengan memvariasi beban menggunakan rangkaian elektronika daya. Beberapa metode algoritma MPPT yang telah dikembangkan dan diteliti antara lain menggunakan metode *Tip Speed Ratio* (TSR), kontrol torsi optimal, perturb & observe, dan metode hybrid. Metode TSR merupakan algoritma MPPT yang paling sederhana berdasarkan karakteristik koefisien daya terhadap fungsi TSR, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.2.

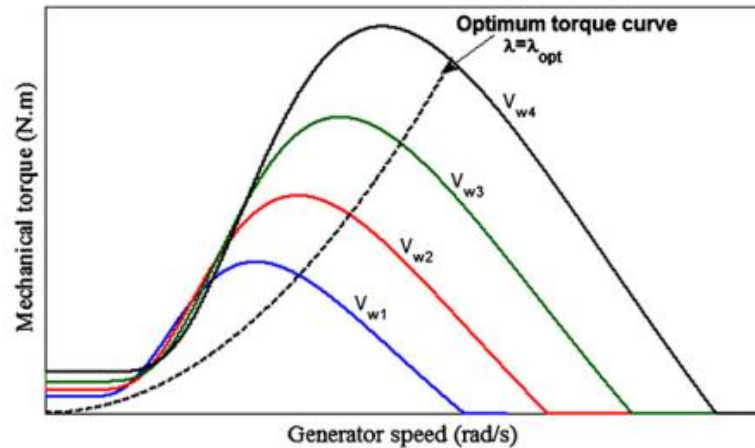
Daya keluaran mekanik pada kecepatan angin dipengaruhi oleh TSR turbin. Efisiensi konversi energi turbin akan maksimal jika nilai TSR optimal sehingga perubahan kecepatan angin harus diikuti dengan perubahan kecepatan rotor turbin untuk mempertahankan TSR pada titik optimal [3]. Pada turbin angin tertentu, kecepatan angin yang berbeda akan memiliki TSR optimal yang sama. Jika TSR dipertahankan konstan pada nilai optimal maka energi yang diekstrak akan maksimal. Oleh karena itu metode ini akan memaksa sistem konversi energi untuk mempertahankan pada titik tertentu dengan membandingkan nilai aktual dan nilai referensi. Titik optimal TSR dapat ditentukan secara eksperimen atau secara teori dan disimpan sebagai referensi[3][24].

$$\omega_{r-opt} = \frac{\lambda_{opt} v}{R} \quad (4.6)$$

Berdasarkan persamaan 4.6, dengan nilai TSR optimal akan menghasilkan kecepatan angular generator optimal. Kecepatan angular optimal generator akan berbeda untuk setiap kecepatan angin yang berbeda dan kecepatan optimal ini merupakan kecepatan referensi untuk kontroler kecepatan yang akan mengatur kecepatan generator untuk mendapatkan daya optimal. Walaupun metode ini terlihat sederhana namun membutuhkan pengukuran kecepatan angin yang presisi sehingga meningkatkan biaya sistem[3][25].

Dibandingkan dengan metode TSR, metode kontrol torsi optimal (OTC) lebih sederhana, cepat dan efisien karena tidak membutuhkan pengukuran kecepatan angin secara langsung sehingga perubahan angin tidak mempengaruhi sinyal referensi secara langsung. Namun efisiensi metode OTC lebih rendah dibandingkan metode TSR [82]. Prinsip dari metode OTC adalah mengatur torsi

PMSG berdasarkan torsi referensi daya maksimum turbin angin pada kecepatan angin tertentu. Kurva torsi optimum seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.3, dimana daya turbin ditentukan berdasarkan persamaan 4.1. Dibandingkan dengan metode *tip speed ratio* (TSR), OTC menghasilkan performansi yang lebih baik [3].



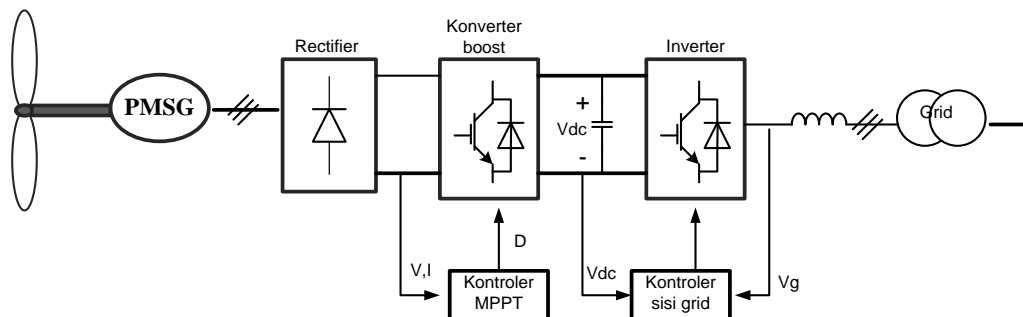
Gambar 4.3 Kurva Torsi Optimum [4]

Metode TSR dan OTC merupakan metode algoritma sederhana dengan kecepatan pelacakan daya maksimum yang tinggi dan performansi yang cukup baik. Namun metode ini membutuhkan sensor mekanik berupa anemometer dan tachometer untuk pengukuran kecepatan angin dan kecepatan rotor. Penggunaan metode ini mengurangi akurasi sistem dan meningkatkan biaya sistem [24]. Beberapa penelitian telah mengembangkan algoritma kontroler tanpa menggunakan informasi kecepatan angin untuk melacak titik daya maksimum yaitu menggunakan metode *perturb&observe* (P&O). Selain ketiga metode dasar di atas, MPPT untuk energi angin juga telah dikembangkan dengan menggunakan kontrol kecerdasan buatan dan metode hibrid. Metode hibrid merupakan kombinasi dari dua metode yang menggunakan kelebihan satu metode untuk mengatasi kerugian metode yang lain. Hui Joanne [7] menggunakan kontrol logika fuzzy master slave untuk MPPT sistem energi angin yang terdiri dari dua kontrol logika fuzzy. Kontrol logika fuzzy pertama berfungsi sebagai master yang memiliki masukan berupa kecepatan PMSG dan daya keluaran konverter boost dengan keluaran berupa kecepatan referensi. Sedangkan kontrol logika fuzzy kedua berfungsi sebagai slave dengan masukan kecepatan referensi dari FLC

master dan kecepatan PMSG dengan keluaran berupa perubahan *duty cycle* yang digunakan untuk mengatur konverter boost. Eltamaly & Farh [83] juga mengaplikasikan kontrol logika fuzzy untuk mencari daya maksimum pada kecepatan angin dibawah kecepatan rata-rata turbin angin dan memastikan daya tidak akan melebihi daya rata-rata untuk kecepatan angin diatas nilai rata-rata. Adhikari Neha [85] juga menggunakan logika fuzzy untuk mengekstrak daya maksimum melalui pengaturan *duty cycle* dari konverter dc-dc, sedangkan kualitas daya pada beban konsumen diatur menggunakan kontroler tegangan keluaran yang mengatur tegangan dan arus keluaran *voltage source inverter* (VSI).

4.2 Sistem Konversi Energi Angin Terhubung Ke Grid

Gambar 4.4 menunjukkan sistem konversi energi angin (SKEA) yang terhubung ke grid dengan menggunakan PMSG dan konverter daya *full scale*. Konfigurasi konverter daya terbagi menjadi dua bagian yaitu *rotor side converter* (RSC) dan *grid side converter* (GSC). RSC terdiri dari rangkaian *rectifier* dioda tiga fasa dan konverter boost yang dikontrol oleh kontroler MPPT. Sedangkan GSC merupakan *voltage source inverter* (VSI) yang dikontrol oleh kontroler GSC. Kontroler MPPT berfungsi untuk meningkatkan efisiensi SKEA melalui pengaturan kecepatan generator. Untuk mencapai titik daya maksimum, generator harus berputar pada kecepatan optimal untuk setiap perubahan kecepatan angin. Seperti yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya, pengaturan kecepatan generator dapat dilakukan melalui pengaturan *duty cycle* dari konverter boost. Kontroler MPPT bekerja berdasarkan pengukuran tegangan dan arus keluaran penyearah untuk menghasilkan *duty cycle* pada konverter boost.



Gambar 4. 4 Sistem Konversi Energi Angin Terhubung Ke Grid

Sistem konversi energi angin terhubung ke grid melalui *voltage source inverter* dan filter sebagai konverter sisi grid. Untuk mendapatkan kualitas daya yang baik pada grid dibutuhkan kontroler sisi grid. Untuk mendapatkan tegangan yang konstan pada sisi grid dengan perubahan kecepatan angin maka tegangan DC-link harus dipertahankan konstan. Sehingga kontroler sisi grid berfungsi untuk mempertahankan tegangan DC-link melalui pengaturan PWM pada inverter berdasarkan tegangan DC link referensi.

4.3 Ekstraksi Daya Maksimum Dengan Metode Perturb & Observe (P&O)

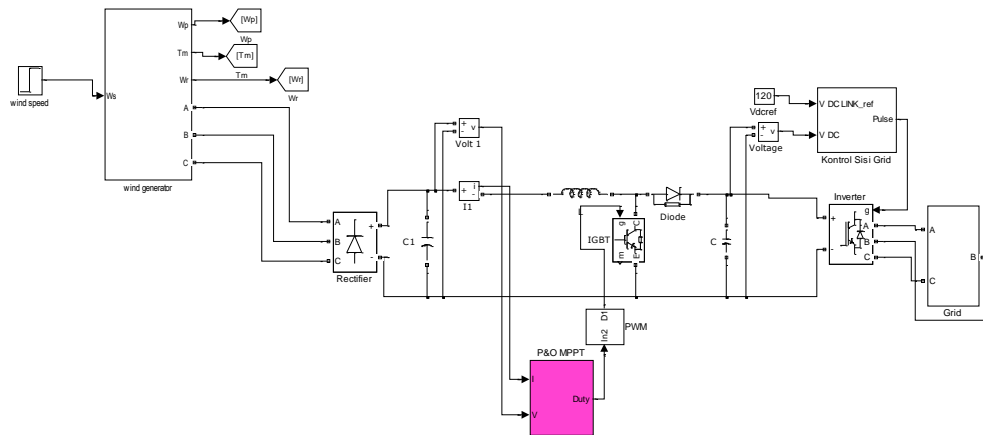
Metode *Perturb&observe* (P&O) disebut juga dengan metode *hill climbing search* (HCS) merupakan salah satu algoritma yang banyak digunakan secara luas untuk mengekstrak daya maksimum pada turbin angin terhadap variasi kecepatan angin. Penggunaan metode P&O tidak membutuhkan anemometer untuk pengukuran kecepatan angin, tidak membutuhkan pengetahuan turbin angin dan karakteristik generator. Kelebihan metode ini adalah struktur yang sederhana, mudah diimplementasikan, parameter yang dibutuhkan sedikit dan memiliki performansi yang baik terhadap variasi parameter fisik [86][83][35][24][27]. Nilai daya maksimum turbin angin didapatkan dengan cara mengatur besaran tegangan dc pada konverter melalui pengaturan *duty cycle* pada konverter dc/dc. Seperti yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya, perubahan *duty cycle* akan menghasilkan perubahan resistansi masukan pada konverter boost sehingga arus masukan dan arus generator akan berubah yang secara langsung akan menghasilkan perubahan kecepatan PMSG. Dengan perubahan besar tegangan dc pada konverter, maka nilai daya juga akan berubah. Metode ini mengatur dan mengamati setiap perubahan tersebut.

Beberapa penelitian mengimplementasikan metode P&O untuk mengekstrak daya maksimum turbin angin dengan menggunakan variabel elektrik. Perubahan tegangan keluaran dan daya keluaran *rectifier* digunakan sebagai masukan metode P&O yang menghasilkan perubahan *duty cycle* untuk konverter boost. Metode P&O dapat mencari titik daya maksimum namun menghasilkan osilasi pada daya DC yang dihasilkan [27]. Penggunaan variasi daya turbin angin

dan kecepatan rotor generator juga dapat digunakan pada metode P&O untuk menghasilkan perubahan pada *duty cycle* konverter dc/dc[86].

4.3.1 Metode Perturb & Observe (P&O)

Pada penelitian ini menggunakan menggunakan metode P&O untuk mengekstrak daya maksimum pada turbin angin dengan PMSG skala kecil, sebagai pembanding metode MPPT dengan menggunakan kecerdasan buatan. SKEA terhubung dengan grid yang dilengkapi dengan kontroler untuk konverter sisi grid, seperti yang telah dijelaskan pada sub bab sebelumnya. Pemodelan dilakukan dengan menggunakan blok powersim system pada Matlab, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.5. Masukan pada metode P&O adalah arus dan tegangan dc yang dihasilkan pada *rectifier* sedangkan keluaran metode tersebut adalah *duty cycle* untuk konverter boost.



Gambar 4. 5 Pemodelan Simulink Untuk Implementasi MPPT dengan Metode P&O

Metode P&O bekerja berdasarkan pada perubahan variabel kontrol dalam ukuran yang kecil dan mengamati perubahan fungsi target hingga slope mencapai nol. Variabel kontrol berdasarkan kurva MPPT turbin angin yang merupakan hubungan antara daya dan kecepatan rotor, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.6. Berdasarkan kurva tersebut dapat dibagi menjadi tiga daerah yaitu

$$\frac{dP}{d\omega} > 0 \quad \text{Sisi kiri MPP} \quad (4.7)$$

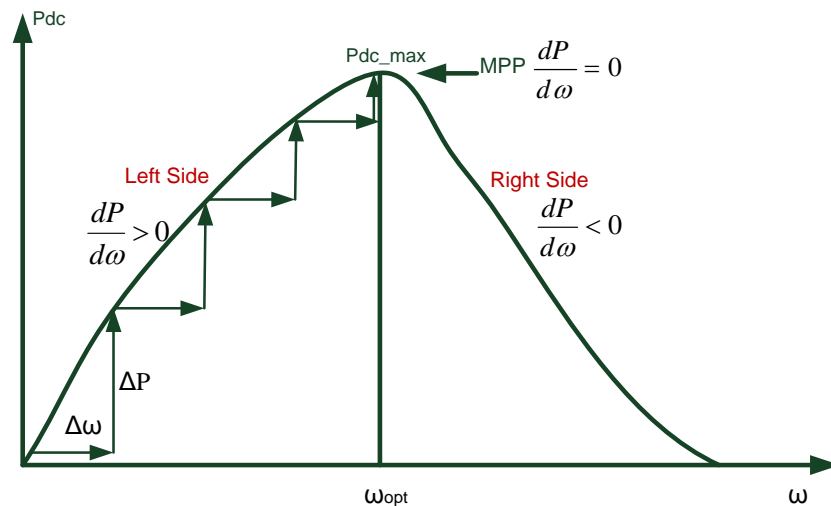
$$\frac{dP}{d\omega} < 0 \quad \text{Sisi kanan MPP} \quad (4.8)$$

$$\frac{dP}{d\omega} = 0 \quad \text{pada MPP} \quad (4.9)$$

Dimana $\frac{dP}{d\omega}$ merupakan slope perbandingan antara selisih daya yang dihasilkan dan kecepatan rotor. Perubahan kecepatan rotor sebanding dengan tegangan yang dihasilkan oleh generator. Hubungan antara kecepatan rotor dengan tegangan dc yang dihasilkan oleh rangkaian *rectifier* dinyatakan pada persamaan 3.32. Berdasarkan persamaan tersebut, hubungan antara dua variabel bukan merupakan persamaan garis lurus, namun untuk menyederhanakan desain kontrol yang tidak menggunakan pengukuran rotor dapat digunakan pendekatan garis lurus yang dapat dinyatakan dengan

$$V_{dc} = K_r \cdot \omega \quad (4.10)$$

Dimana V_{dc} merupakan tegangan dc yang dihasilkan *rectifier*, K_r merupakan konstanta pendekatan dan ω merupakan kecepatan rotor.



Gambar 4. 6 Kurva Karakteristik Pada Metode P&O

Berdasarkan persamaan 4.10 , tegangan dc (V_{dc}) yang dihasilkan akan sebanding dengan kecepatan rotor, sehingga pada penelitian ini menggunakan parameter daya dc yang dihasilkan oleh *rectifier* (P_{dc}) dan tegangan dc yang dihasilkan (V_{dc}). Titik daya maksimum (MPP) akan dicapai bila $\frac{dP_{dc}}{dV_{dc}} = 0$

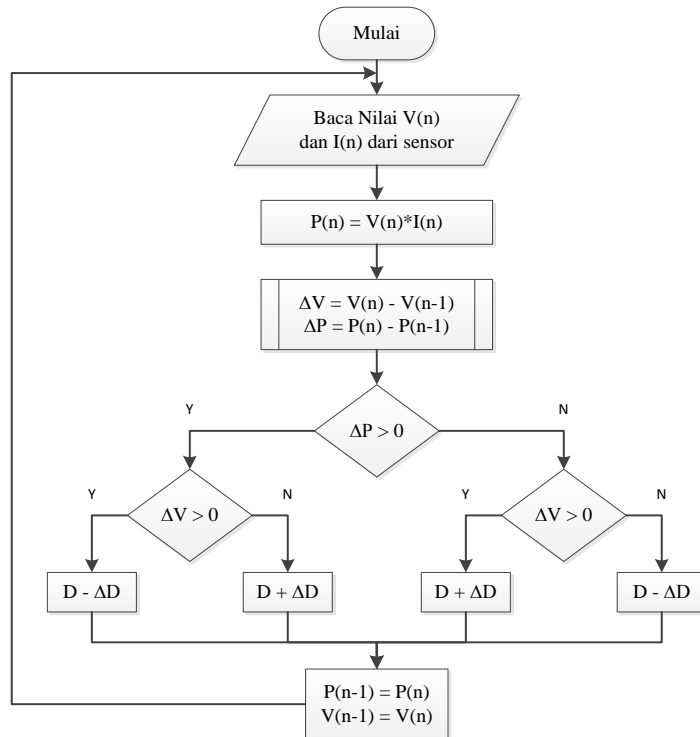
Dimana

$$P_{dc} = V_{dc} (n) \times I_{dc} (n) \quad (4.11)$$

$$dP_{dc} = P_{dc}(n) - P_{dc}(n-1) \quad (4.12)$$

$$dV_{dc} = V_{dc}(n) - V_{dc}(n-1) \quad (4.13)$$

Algoritma metode P&O seperti ditunjukkan pada Gambar 4.7, dimana metode P&O mengamati setiap perubahan P_{dc} , V_{dc} , dan slope $\frac{dP_{dc}}{dV_{dc}}$ untuk menghasilkan *duty cycle* dengan perubahan *duty cycle* atau *step size* (ΔD) berupa nilai konstanta yang tetap. Jika nilai $\frac{dP_{dc}}{dV_{dc}} > 0$ maka titik operasi berada disebelah kiri MPP sehingga kecepatan PMSG harus dinaikkan dengan menurunkan *duty cycle* (D) sebesar ΔD . Demikian pula sebaliknya, jika nilai $\frac{dP_{dc}}{dV_{dc}} < 0$ maka titik operasi berada disebelah kanan MPP sehingga kecepatan PMSG harus diturunkan dengan menaikkan nilai D .



Gambar 4. 7 Flowchart metode *perturb and observe*

Prosedur algoritma P&O terdiri dari beberapa langkah, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.7, yang dapat dijelaskan sebagai berikut:

Langkah 1 : Pembacaan nilai tegangan dan arus keluaran dari rangkaian penyearah

Langkah 2 : Melakukan perhitungan daya, selisih daya dan tegangan seperti pada persamaan (4.11) – (4.13).

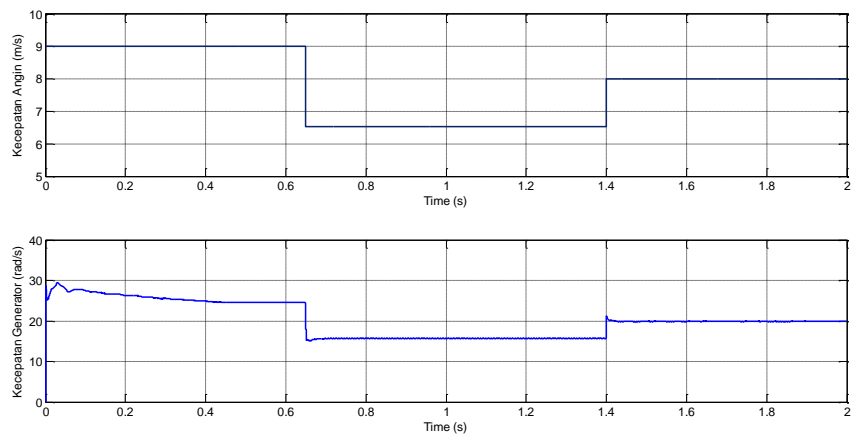
Langkah 3 :Melakukan perbandingan antara daya (P_{dc}) saat ini dengan sebelumnya

Langkah 4 :Melakukan perbandingan antara tegangan (V_{dc}) saat ini dengan sebelumnya.

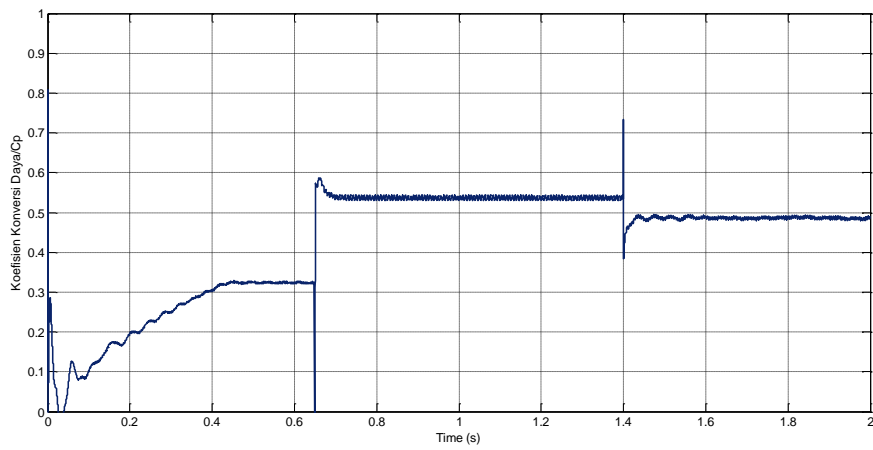
Langkah 5 : Menentukan nilai *duty cycle* (D) berdasarkan perbandingan P_{dc} dan V_{dc} dengan nilai *step size* sebesar 0,005. Jika $\frac{dP_{dc}}{dV_{dc}} > 0$ maka nilai D diperkecil, demikian pula sebaliknya.

4.3.2 Hasil Simulasi Ekstraksi Daya Maksimum Dengan Metode Perturb & Observe (P&O)

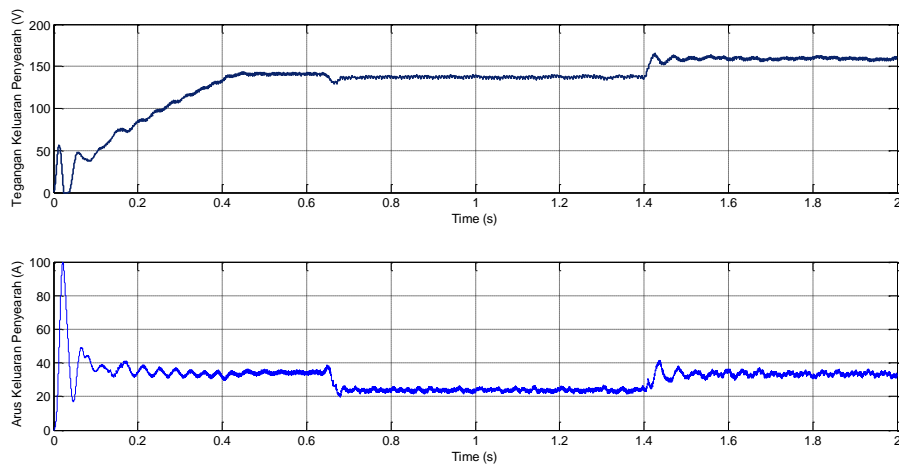
Algoritma P&O yang telah didesain dievaluasi melalui simulasi menggunakan Simpower Matlab dengan memberikan variasi perubahan kecepatan angin pada 9m/s diturunkan menjadi 6,5m/s dan kemudian meningkat menjadi 8m/s. Algoritma P&O mencari titik daya maksimum dengan menghasilkan *duty cycle* untuk mengatur kecepatan generator yang juga mengalami perubahan mengikuti perubahan kecepatan angin, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.8a. Pada kecepatan angin tertentu maka generator harus berputar pada kecepatan optimal dan sistem turbin angin bekerja dengan koefisien konversi daya optimal. Penggunaan algoritma P&O belum dapat mempertahankan koefisien konversi daya untuk tetap bekerja optimal dengan variasi perubahan kecepatan angin, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.8b. Hal ini dikarenakan algoritma ini sangat tergantung pada penentuan *step size duty cycle*, dengan perubahan yang terlalu kecil maka membutuhkan waktu yang lama untuk mendapatkan titik daya maksimum. Gambar 4.8c menunjukkan tegangan dan arus keluaran penyearah, sedangkan gambar 4.8d menunjukkan daya keluaran penyearah yang mengikuti perubahan kecepatan angin. Pada kecepatan angin 9m/s menghasilkan daya keluaran penyearah sebesar 4800W, pada 6,5m/s sebesar 3200W dan 5000W pada kecepatan angin 8m/s



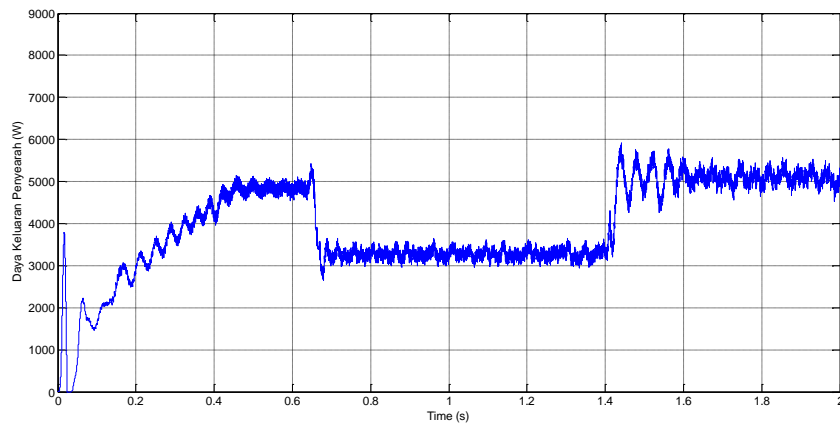
(a) Kecepatan Angin Dan Kecepatan Generator



(b) C_p



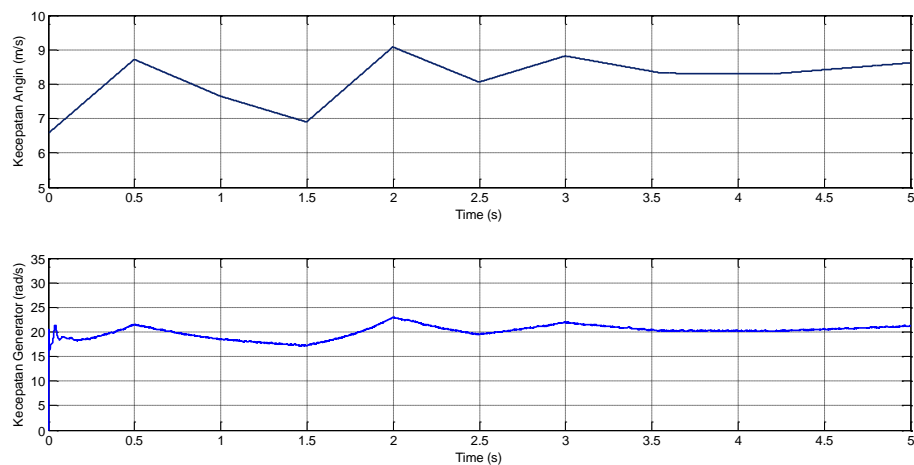
(c) Tegangan Dan Arus Keluaran Penyearah



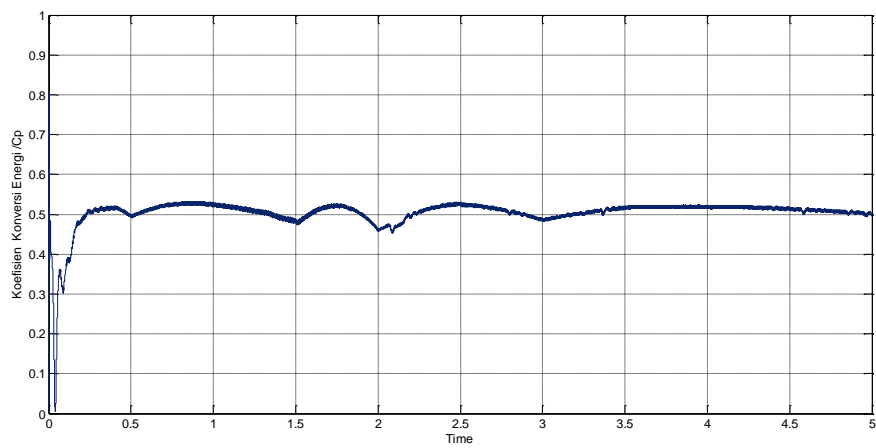
(d) Daya Keluaran Penyearah

Gambar 4.8 Hasil Simulasi P&O Dengan Perubahan Kecepatan Angin Step

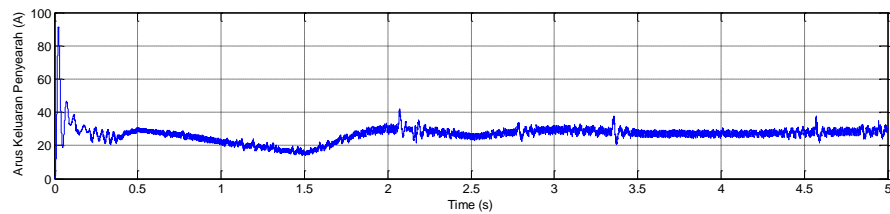
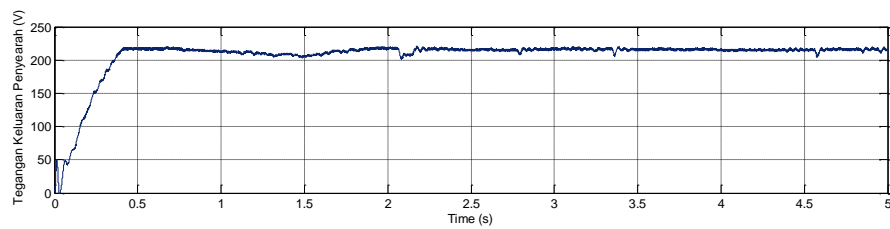
Untuk mengetahui unjuk kerja algoritma P&O terhadap perubahan kecepatan angin yang cepat, algoritma ini juga diuji dengan memberikan perubahan kecepatan angin acak seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.9a. Dengan variasi kecepatan angin acak, algoritma P&O dapat mentracking titik daya optimum dengan mempertahankan nilai koefisien konversi daya pada nilai optimum, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.9b. Gambar 4.9c menunjukkan tegangan dan arus keluaran penyearah dan Gambar 4.9d menunjukkan daya keluaran penyearah yang mengikuti perubahan kecepatan angin dan beroperasi pada titik daya maksimum.



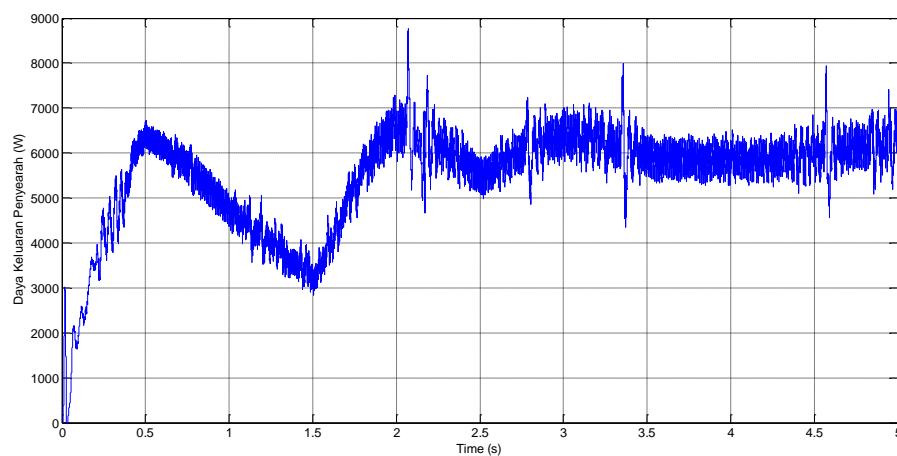
(a) Kecepatan Angin Dan Kecepatan Generator



(b) C_p



(c) Tegangan Dan Arus Keluaran penyearah



(d) Daya Keluaran Penyearah

Gambar 4. 9 Hasil Simulasi P&O Dengan perubahan Kecepatan Angin Acak

Penggunaan metode P&O memiliki keterbatasan yaitu sulit untuk mencapai MPP pada kondisi variasi angin yang tinggi jika menggunakan turbin angin dengan inersia besar dan medium. Selain itu pemilihan ukuran perubahan atau *step size* tidak mudah untuk ditentukan. Perubahan yang besar akan menghasilkan respon yang lebih cepat dan osilasi yang lebih besar disekitar titik puncak sehingga efisiensi semakin kecil sedangkan perubahan yang kecil akan meningkatkan efisiensi tetapi mengurangi kecepatan konvergen. Tingkat efisiensi dari metode ini bergantung pada besaran variabel ΔD . Apabila nilai ΔD besar maka sistem akan cepat menuju pada nilai maksimum, tetapi akan menghasilkan fluktuasi yang besar saat sudah mencapai nilai maksimum yang mengakibatkan osilasi pada daya yang dihasilkan, sehingga efisiensinya rendah. Jika menggunakan ΔD yang kecil maka efisiensi sistem akan lebih baik, tetapi waktu yang dibutuhkan untuk menuju nilai maksimum sangatlah lambat yang mengakibatkan sistem tidak responsif.

4.4 Ekstraksi Daya Maksimum Dengan Metode PSO

Penggunaan metode P&O pada sistem turbin angin untuk ekstraksi daya maksimum memiliki keterbatasan. Untuk mengatasi keterbatasan tersebut telah dikembangkan penggunaan kecerdasan buatan untuk mengekstraksi daya maksimum. Metode *Particle Swarm Optimization* (PSO) telah dikembangkan sebagai MPPT untuk sistem fotovoltaik. Daya maksimum sistem fotovoltaik ditentukan oleh PSO berdasarkan tegangan dan arus fotovoltaik yang akan menentukan daya yang dihasilkan. Berdasarkan hasil eksperimen, PSO dapat menentukan titik daya maksimum dengan waktu konvergen lebih cepat dan respon dinamik yang lebih baik dibandingkan metode *perturb&observe* [87].

Penggunaan metode PSO juga telah dikembangkan oleh Abdullah dkk [88] untuk mengekstrak daya maksimum pada turbin angin dengan PMSG. Penentuan daya maksimum ditentukan berdasarkan daya konverter sebagai fungsi objektif dari metode PSO. Algoritma yang telah dikembangkan disimulasikan pada sistem turbin angin stand alone. Berdasarkan simulasi, metode PSO berhasil mempertahankan koefisien daya turbin angin pada nilai optimal melalui pengaturan *duty cycle* konverter boost tanpa membutuhkan sensor mekanik dan

pengetahuan sistem. Dibandingkan dengan metode P&O, PSO memiliki efisiensi dan akurasi lebih baik. Selain itu penggunaan PSO tidak menimbulkan osilasi di sekitar titik maksimum. PSO juga digunakan untuk mengatur penalaan kontroler proporsional integral (PI) yang digunakan untuk mengatur kecepatan PMSG pada SKEA. Dibandingkan kontroler PI, penggunaan kontroler PSO – PI menghasilkan performansi yang lebih baik [68].

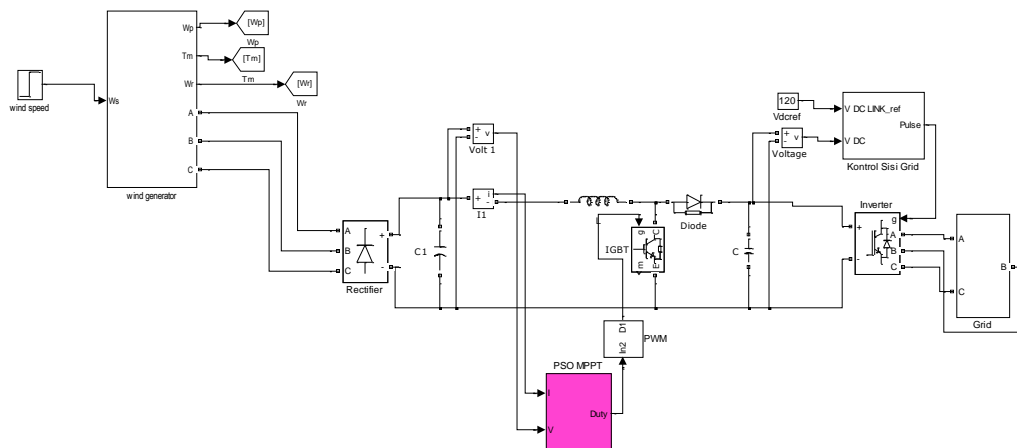
Kahla dkk [89] menggunakan PSO untuk mengatur kontrol on-off yang digunakan untuk pencarian titik daya maksimum pada turbin angin dengan DFIG. Algoritma PSO untuk menghasilkan kontroler on-off. Sedangkan kontrol on-off digunakan untuk mengatur konverter sisi rotor pada turbin angin yang terhubung dengan grid dan baterai sebagai penyimpan energi. Fungsi objektif dari PSO merupakan nilai minimum *mean square error* (MSE). Berdasarkan hasil simulasi, penggunaan PSO dapat meningkatkan performansi sistem dimana tegangan DC bus dapat dipertahankan konstan terhadap perubahan angin. Selain itu Kongnam [90] mengaplikasikan PSO untuk mengontrol turbin angin agar bekerja pada kecepatan rotor optimal. Posisi partikel mewakili kecepatan rotor, *tip speed ratio*, dan *blade pitch angle* dengan fungsi *fitness* merupakan koefisien daya. Berdasarkan hasil simulasi, PSO dapat menyelesaikan masalah kontrol pada turbin angin secara efektif dimana perubahan angin secara stokastik dapat diatasi. Energi yang dapat ditangkap pada *variable speed wind turbine* lebih besar dibandingkan pada *fixed speed wind turbine*. Namun penggunaan *blade pitch angle* sebagai posisi partikel tidak sesuai untuk sistem turbin angin dengan sudut *pitch* yang tetap. Penggunaan pengaturan *pitch angle* meningkatkan stress mekanik.

4.4.1 Metode PSO

Metode PSO merupakan algoritma berbasis kecerdasan buatan yang telah banyak digunakan untuk menyelesaikan masalah optimisasi [91][87-89][44]. Metode optimasi yang didasarkan pada *swarm intelligence* ini disebut algoritma *behaviorally inspired* sebagai alternatif dari algoritma genetika, yang sering disebut *evolution-based procedures*. PSO dikenalkan pertama kali oleh Kennedy dan Eberhart pada tahun 1995 [92] berdasarkan *social-psychological theory* yang

terinspirasi perilaku sekumpulan hewan seperti semut, rayap, lebah atau burung. Perilaku sosial terdiri dari tindakan individu dan pengaruh dari individu lain dalam satu kelompok. Setiap individu, misalnya seekor burung, dinyatakan sebagai partikel yang memiliki dua karakteristik yaitu posisi dan kecepatan. Setiap partikel bergerak dalam ruang tertentu dengan mengingat posisi terbaik yang pernah dilalui atau terhadap nilai fungsi obyektif yang kemudian akan menyampaikan informasi atau posisinya pada partikel yang lain. Berdasarkan posisi tersebut maka partikel yang lain dalam kelompok tersebut akan menyesuaikan posisi dan kecepatannya [88].

Sistem PSO diinisialisasi oleh sebuah populasi solusi secara acak dan selanjutnya mencari titik optimum dengan cara meng-update tiap hasil pembangkitan berdasarkan fungsi objektif. Jika partikel dalam ruang vektor-d, dinyatakan dengan $X_i = \{X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{iD}\}$ dan posisi terbaik yang ditentukan oleh masing-masing partikel tersebut dengan P_{best} . Sedangkan posisi terbaik yang ditentukan kelompoknya disebut dengan G_{best} . Setiap partikel menunjukkan suatu solusi dan memiliki posisi. Pada setiap langkah, suatu fungsi *fitness* atau fungsi objektif menunjukkan suatu pengukuran kualitas yang dihitung menggunakan X_i sebagai masukan. Setiap partikel berada pada jalur posisi terbaik P_{best} yang dihubungkan dengan dengan *fitness* terbaik yang dapat dicapai. Selanjutnya posisi terbaik dari semua partikel akan menjadi jalur kelompoknya, G_{best} . Semua informasi ini dibagi oleh semua partikel untuk solusi terbaik [26].



Gambar 4. 10 Model Untuk Implementasi MPPT dengan Metode PSO

Pada penelitian ini PSO digunakan untuk mengekstrak daya maksimum pada sistem turbin angin dengan PMSG yang terhubung ke grid. Algoritma diuji melalui simulasi menggunakan powersim pada Simulink Matlab, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.10. Penentuan titik daya maksimum berdasarkan nilai tegangan dan arus keluaran rangkaian penyearah yang digunakan untuk menghitung nilai daya konverter. Algoritma PSO akan menentukan *duty cycle* yang sesuai untuk mendapatkan titik daya maksimum. Oleh karena dalam algoritma PSO ini dapat dibagi menjadi tiga variabel yaitu :

- Posisi partikel dalam PSO menunjukkan *duty cycle*
- Kecepatan partikel merupakan perubahan (*step size*) dari *duty cycle*
- Fungsi objektif merupakan fungsi untuk memaksimalkan daya konverter

Kecepatan dan posisi partikel dapat ditentukan berdasarkan persamaan

$$V_i^{k+1} = w V_i^k + C_1 r_1 (d_{pbesti}^k - d_i^k) + C_2 r_2 (d_{gbesti}^k - d_i^k) \quad (4.14)$$

$$d_i^{k+1} = d_i^k + V_i^k \quad (4.15)$$

Dimana w merupakan faktor momentum.

r_1 dan r_2 merupakan dua nilai random antara 0 dan 1

C_1 dan C_2 merupakan konstanta positif yang dikenal dengan konstanta akselerasi

d_i^k merupakan *duty cycle* saat ini

d_i^{k+1} merupakan *duty cycle* termodifikasi

d_{pbesti}^k merupakan *duty cycle* terbaik untuk setiap partikel

d_{gbesti}^k merupakan *duty cycle* terbaik pada kelompok

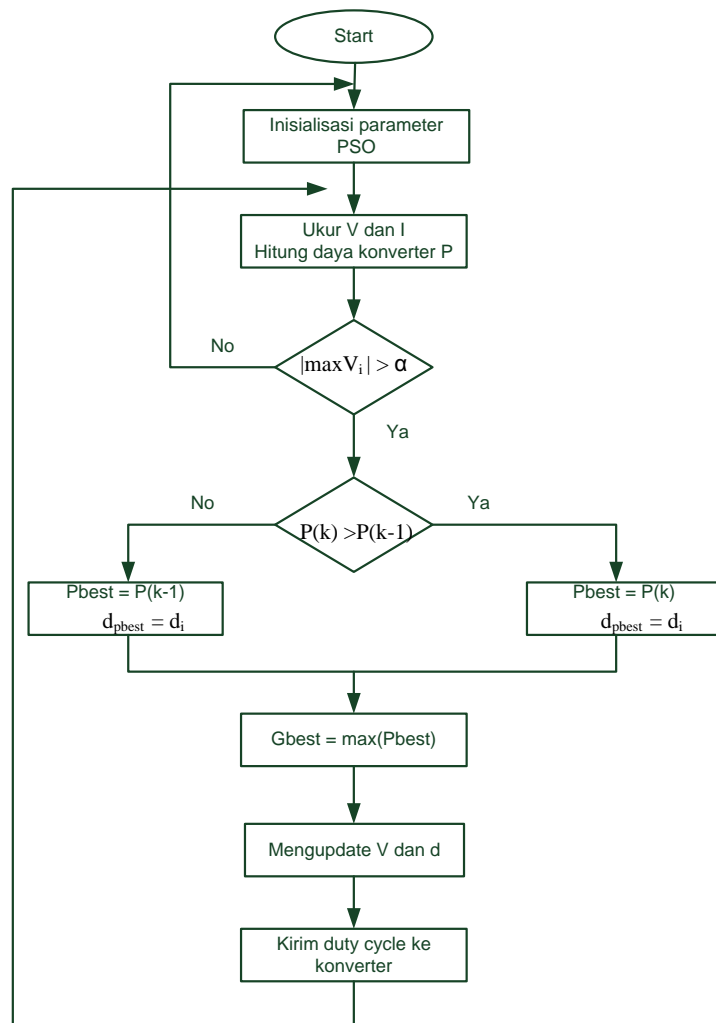
V_i^k merupakan kecepatan partikel saat ini

V_i^{k+1} merupakan kecepatan partikel termodifikasi

Gambar 4.11 menunjukkan diagram alir algoritma PSO sebagai MPPT pada turbin angin, dimana terdiri dari beberapa tahapan yang dapat dijelaskan sebagai berikut :

- Langkah 1 : inialisasi parameter PSO dimana $w = 0,01$, $C_1 = 0,5$, $C_2 = 0,7$, $\alpha = 0,05$, jumlah partikel = 10 dan maximum jumlah step = 50
- Langkah 2 : Mengukur tegangan dan arus keluaran penyearah dan menghitung daya konverter dengan menggunakan persamaan $P_{dc} = V_{dc} \cdot I_{dc}$

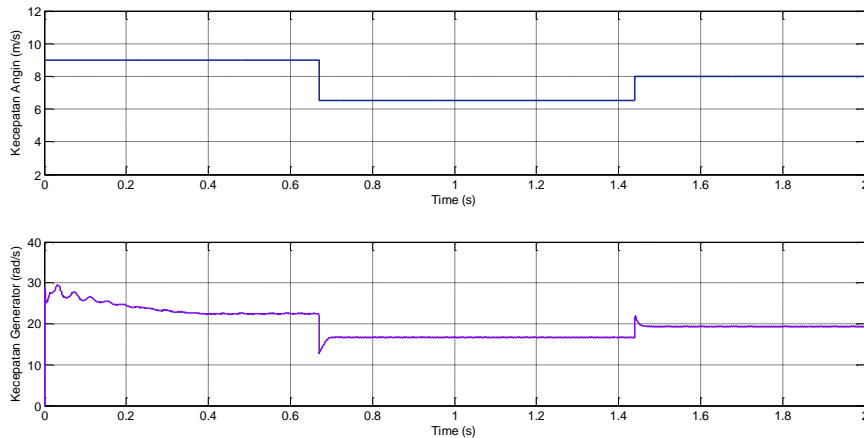
- Langkah 3 : membandingkan nilai maksimal kecepatan apakah lebih dari α , jika lebih dari α diperlukan inisialisasi ulang parameter PSO
- Langkah 4 : menentukan nilai daya konverter terbesar yang merupakan fungsi objektif. Jika daya konverter saat ini lebih besar dari sebelumnya maka nilai partikel terbaik sama dengan daya saat ini dan $d_{pbest} = d_i$, demikian pula sebaliknya.
- Langkah 5 : menentukan nilai terbaik kawanannya berdasarkan nilai terbesar dari tiap partikel
- Langkah 6 : Memperbaharui posisi dan kecepatan partikel berdasarkan persamaan (4.14) dan (4.15)
- Langkah 7 : Mengirim duty cycle ke konverter boost.



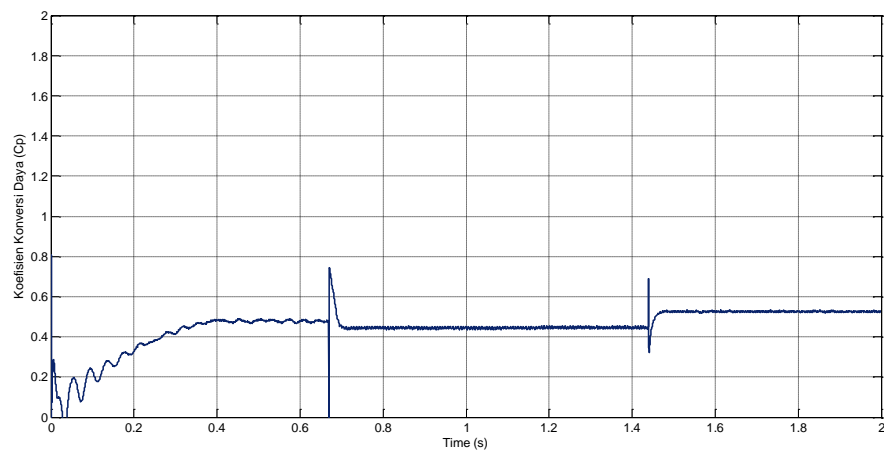
Gambar 4. 11 Diagram Alir Algoritma PSO Sebagai MPPT

4.4.2 Hasil Simulasi Ekstraksi Daya Maksimum Dengan Metode PSO

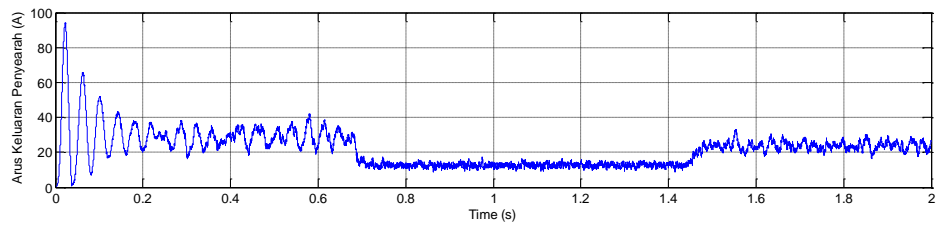
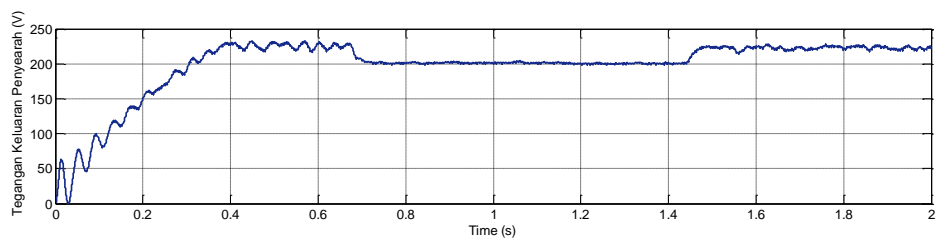
Pengujian algoritma PSO dilakukan menggunakan SimPower Matlab dengan memberikan variasi perubahan kecepatan angin seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.12a. Kecepatan angin diberikan sebesar 9m/s hingga 0,65s yang kemudian diturunkan menjadi 6,5m/s hingga 1,45s dan dinaikkan kembali menjadi 8m/s. Algoritma PSO akan menentukan titik daya maksimum sehingga PMSG akan berputar pada kecepatan optimal untuk setiap kecepatan angin tertentu, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.12a. Dengan variasi kecepatan angin maka kecepatan rotor optimal yang dihasilkan juga mengikuti perubahan tersebut. Pada kecepatan angin 9m/s, kecepatan rotor akan mencapai *steady state* pada 22rad/s dan akan turun menjadi 17rad/s pada kecepatan angin 6,5m/s yang selanjutnya akan meningkat mengikuti perubahan kecepatan angin menjadi 20rad/s pada kecepatan angin 8m/s. Algoritma PSO dapat mempertahankan koefisien konversi daya pada nilai optimal terhadap variasi angin, seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.12b, walaupun terjadi selisih C_p sebesar 0,04 pada perubahan kecepatan angin dari 6,5m/s ke 8m/s.



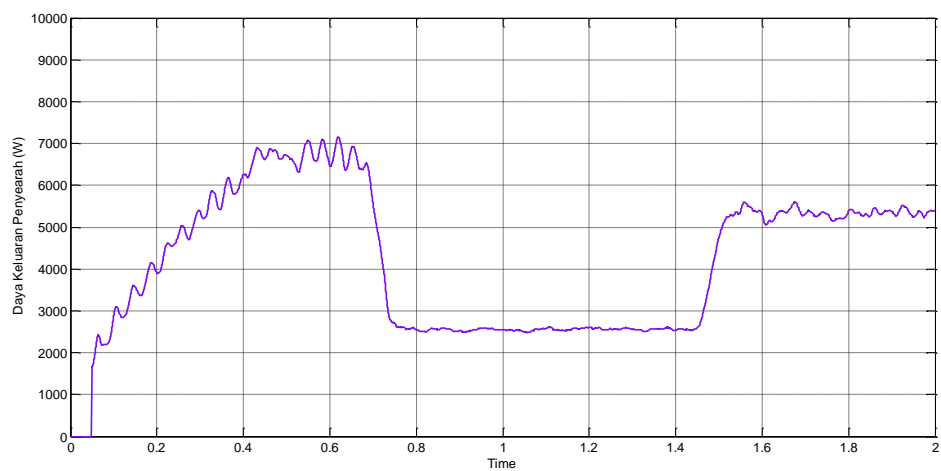
(a) Kecepatan Angin Dan Kecepatan Generator



(b) C_p



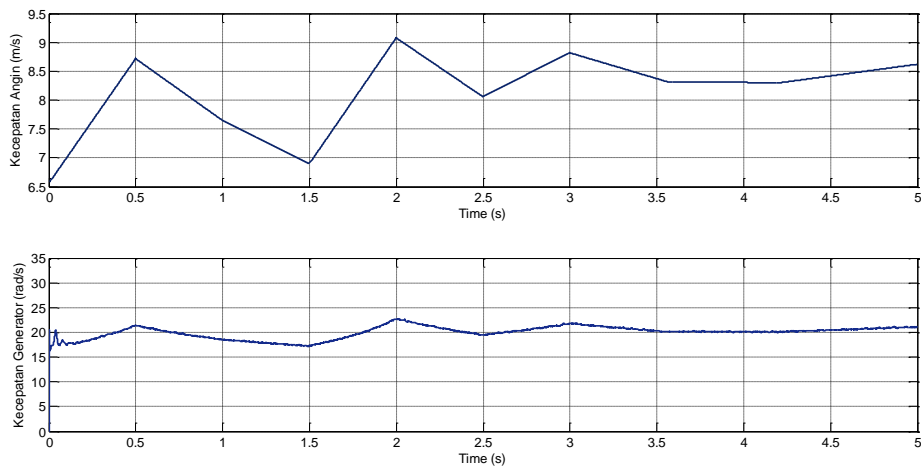
(c) Tegangan dan Arus Keluaran Penyearah



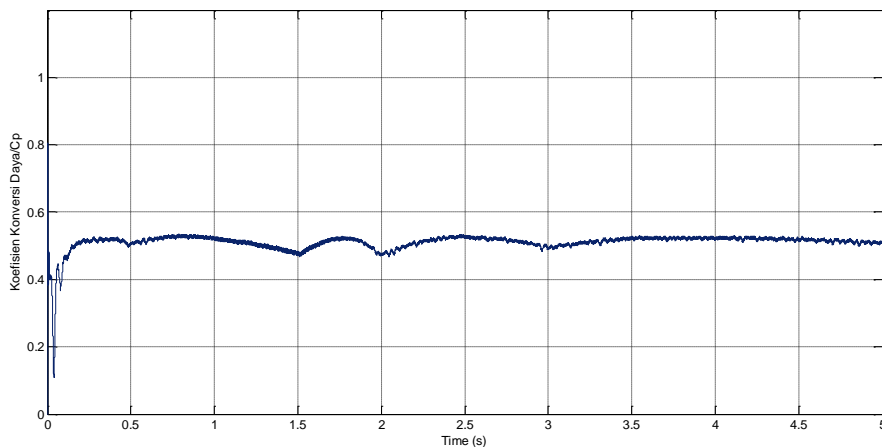
(d) Daya Keluaran Penyearah

Gambar 4. 12 Hasil Simulasi PSO Dengan perubahan Kecepatan Angin Step

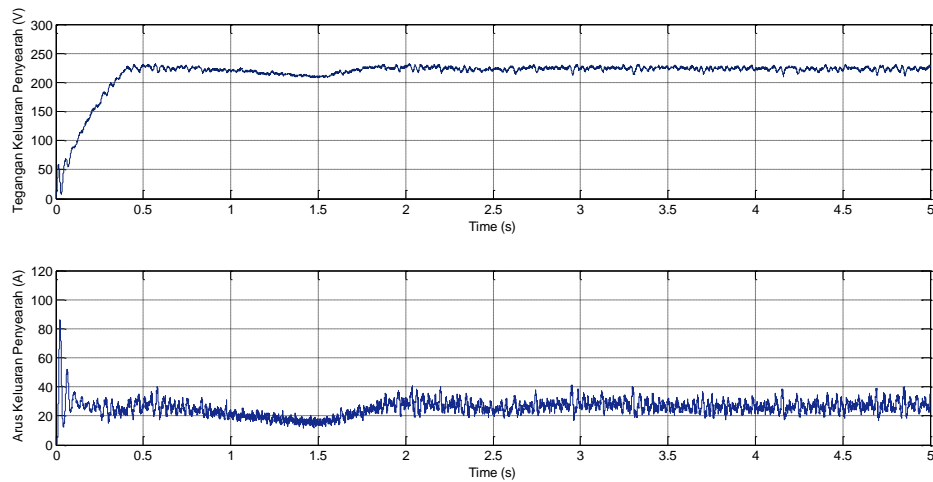
Perubahan kecepatan rotor PMSG akan menghasilkan perubahan tegangan, arus dan daya keluaran pada rangkaian penyearah, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.12d. Semakin besar kecepatan angin akan menghasilkan daya keluaran penyearah semakin besar. Gambar 4.13 Menunjukkan hasil simulasi PSO dengan memberikan variasi perubahan kecepatan angin acak dengan perubahan kecepatan yang lebih cepat dibandingkan pada perubahan kecepatan angin sebelumnya. Dengan variasi kecepatan angin acak, algoritma PSO dapat mentracking titik daya optimum dengan mempertahankan nilai koefisien konversi daya pada nilai optimum.



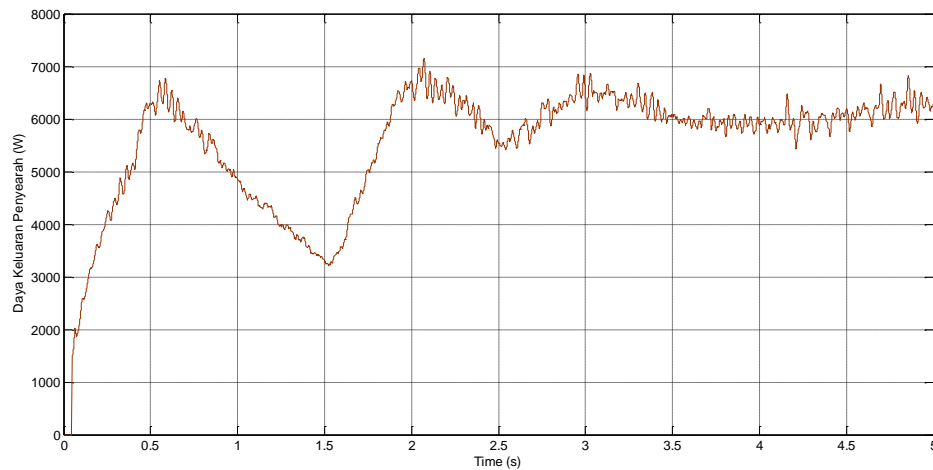
(a) Kecepatan Angin dan Kecepatan Generator



(b) Cp



(c) Tegangan dan Arus Keluaran Penyearah



(d) Daya Keluaran Penyearah

Gambar 4. 13 Hasil Simulasi PSO Dengan perubahan Kecepatan Angin Acak

4.5 Ekstraksi Daya Maksimum Dengan Algoritma *Modified Firefly*

Algoritma *firefly* merupakan salah satu metode *swarm intelligence* yang dikenalkan oleh Yang pada tahun 2008. Metode ini terinspirasi oleh perilaku kunang-kunang di alam bebas. Kunang-kunang dikarakteristik oleh cahaya yang berkedip yang dihasilkan oleh proses bioluminasi yang dihasilkan oleh organ yang disebut dengan lantern [93]. Algoritma *firefly* telah terbukti efisien untuk menyelesaikan masalah optimisasi dan dapat lebih efisien dibandingkan algoritma metaheuristik. Algoritma *firefly* telah diujikan untuk mendapatkan titik daya

maksimum pada sistem fotovoltaik berdasarkan tegangan dan arus keluaran fotovoltaik untuk menghasilkan *duty cycle* konverter boost. Berdasarkan hasil simulasi, algoritma *firefly* dapat mencari titik daya maksimum lebih cepat dibandingkan PSO dan algoritma genetika (GA). Sehingga respon kontroler lebih cepat dan pengiriman daya lebih efisien [94].

Sundareswaran [95] juga mengaplikasikan algoritma *firefly* sebagai MPPT untuk sistem fotovoltaik pada kondisi *partial shaded*. Algoritma telah di validasi melalui simulasi dan eksperimen. Dibandingkan dengan PSO dan P&O, algoritma *firefly* dapat konvergen mencapai MPP lebih cepat disbanding dua metode yang lain, sedangkan metode PSO dan P&O menghasilkan osilasi dalam pencarian MPP. Selain itu algoritma *firefly* juga telah diaplikasikan untuk penentuan penempatan turbin angin [96]. Penentuan penempatan turbin angin berdasarkan total kapasitas energi yang dapat dihasilkan oleh *wind farm*. Hasil yang didapatkan oleh *firefly* lebih optimal dan menghasilkan biaya yang lebih rendah per unit daya yang didapatkan dibandingkan dengan menggunakan algoritma genetika dan metode manual menggunakan excel.

Algoritma *firefly* tergantung pada variasi intensitas cahaya dan formulasi ketertarikan. Beberapa peneliti mengembangkan dan memodifikasi algoritma dengan menggunakan dua karakter *firefly* yang juga tergantung pada parameter koefisien penyerapan cahaya dan koefisien acak. Fister [97] memodifikasi algoritma *firefly* dengan menggunakan aljabar quaternion yang merupakan sistem bilangan yang dikembangkan dari bilangan kompleks. Namun penggunaan modifikasi ini membutuhkan memori yang cukup besar walaupun jika dibandingkan dengan algoritma *firefly*, *artificial bee colony* dan algoritma *bat* memiliki hasil yang lebih baik. Algoritma *modified firefly* juga dikembangkan oleh untuk mengatasi masalah multidimensi *knapsack* yang merupakan persoalan optimasi pada pemilihan benda yang dapat dimasukkan dalam suatu wadah yang memiliki daya tampung terbatas [98]. Walaupun demikian masih belum ada penelitian yang menggunakan *modified firefly* pada penentuan daya maksimum pada sistem konversi energi angin. Oleh karena itu pada penelitian ini akan dikembangkan algoritma *modified firefly* untuk menentukan titik daya maksimum.

4.5.1 Algoritma *Modified Firefly*

Algoritma *modified firefly* dikembangkan dari algoritma *firefly* yang memiliki karakteristik cahaya yang berkedip dan dapat dinyatakan dalam tiga rule yaitu [93] [96]:

1. Semua kunang-kunang memiliki jenis kelamin yang sama sehingga suatu kunang-kunang mengikuti yang lain dengan mengabaikan jenis kelamin.
2. Ketertarikan sebanding dengan kecerahan yang dimiliki kunang-kunang dan keduanya berbanding terbalik dengan jarak antara dua kunang-kunang. Jika dua kunang-kunang berkedip, kunang-kunang yang kurang cerah akan bergerak mengikuti yang lebih cerah. Suatu kunang-kunang akan bergerak secara acak jika tidak ada yang lebih cerah disbanding dirinya.
3. Kecerahan atau intensitas cahaya suatu kunang-kunang dipengaruhi atau ditentukan oleh fungsi objektif yang akan dioptimasi.

Kecerahan dan variasi intensitas cahaya merupakan faktor penting di dalam algoritma *firefly*. Untuk memaksimalkan, kecerahan dapat disederhanakan secara proposional dengan fungsi objektif. Intensitas cahaya bervariasi secara monoton dan eksponensial dengan jarak yang dapat dinyatakan dengan

$$I = I_0 e^{-\gamma r} \quad (4.16)$$

I_0 merupakan intensitas cahaya awal dan γ merupakan koefisien penyerapan cahaya yang merupakan parameter penting yang berhubungan dengan variasi ketertarikan. Nilai γ merepresentasikan koefisien cuaca. Semakin tinggi nilai γ merepresentasikan cuaca berkabut, sedangkan semakin rendah nilai γ merepresentasikan cuaca sedang cerah. Apabila cuaca berkabut, maka kunang-kunang akan cenderung mendekati kunang-kunang yang lebih dekat meskipun kurang terang karena kabut akan menghalangi kecerahan kunang-kunang terlihat oleh yang lain. Berkebalikan dari itu, apabila cuaca cerah maka kunang-kunang dapat melihat seluruh kunang-kunang karena tidak ada kabut yang menghalangi. Kunang-kunang yang redup akan mendekati kunang-kunang yang paling terang, meskipun sangat jauh. Jika γ sebesar 0 maka ketertarikan kunang-kunang dengan lainnya akan konstan dan algoritma *firefly* akan sama dengan particle swarm optimization (PSO). Namun, jika γ sebesar ∞ maka ketertarikan akan sama dengan nol dan kunang-kunang akan bergerak secara acak. r merupakan jarak

antara dua kunang kunang dengan posisi x_i dan x_j yang dinyatakan dengan persamaan euclidean

$$r_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^m (X_{ik} - X_{jk})^2} \quad (4.17)$$

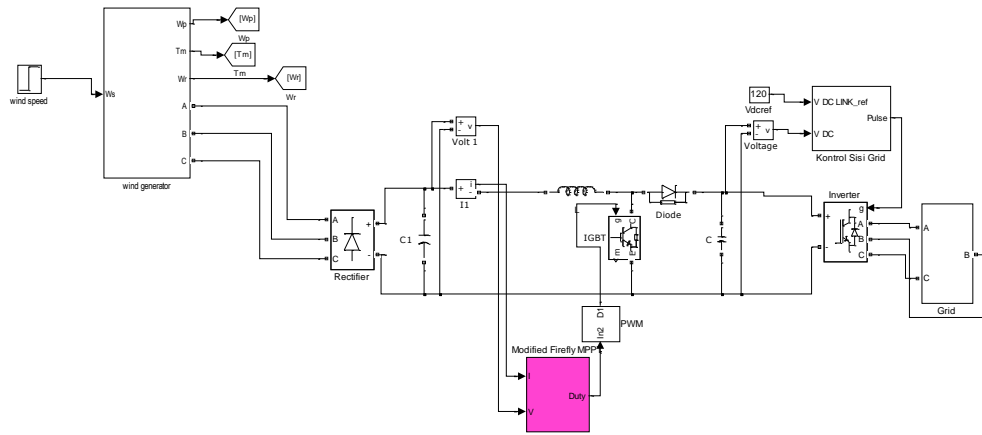
dimana $X_{i,k}$ merupakan komponen kth dari x_i dari kunang-kunang ke i . Jika intensitas cahaya sebanding dengan ketertarikan maka derajat ketertarikan, β_m , merupakan fungsi dari jarak antara dua kunang-kunang yang dapat dinyatakan dengan

$$\beta_m = \beta_o e^{-\gamma r^2} \quad (4.18)$$

Dimana β_o merupakan ketertarikan awal pada saat r sebesar 0. Semakin besar nilai β_m , maka kunang-kunang akan semakin cepat dalam mendekati kunang-kunang yang lebih terang, sehingga proses pencarian menjadi lebih cepat namun kurang akurat. Sebaliknya apabila nilai β_m kecil, maka akan lebih lambat, namun akan lebih teliti dalam mencari nilai puncak [95][99]. Dengan asumsi bahwa kecerahan kunang-kunang ke i kurang dari j maka perpindahan kunang-kunang i mengikuti j dapat dinyatakan dengan

$$X_i = X_i + \beta_o e^{-\gamma r^2} (x_j - x_i) + \alpha \varepsilon_i \quad (4.19)$$

Dimana α merupakan pengali dari nilai vector acak (ε_i) yang suatu angka antara 0 dan 1 yang dibangkitkan dengan menggunakan distribusi normal. Kunang-kunang selain bergerak mendekati kunang-kunang yang lebih terang juga bergerak secara acak. Semakin besar nilai α , maka kunang-kunang akan cenderung bergerak secara acak. Pergerakan kunang-kunang tergantung dari tiga kondisi yaitu posisi kunang-kunang saat ini, daya tarik kunang-kunang satu dengan yang lain, dan gerakan acak kunang-kunang yang ditentukan oleh nilai α . Jumlah kunang-kunang juga mempengaruhi kecepatan dan ketepatan dari proses pencarian daya puncak. Semakin banyak kunang-kunang, maka dalam satu iterasi akan memerlukan banyak waktu, namun pencarian akan lebih akurat. Kemudian apabila jumlah kunang-kunang sedikit, maka dalam satu iterasi proses pencarian akan lebih cepat namun tidak akurat [93] .



Gambar 4. 14 Pemodelan Untuk Implementasi MPPT dengan Metode *Modified Firefly*

Dalam penelitian ini, algoritma *firefly* yang akan dimodifikasi sebagai MPPT untuk mendapatkan titik daya maksimum pada sistem turbin angin dengan PMSG yang terhubung ke grid. Performansi algoritma telah divalidasi melalui Simulasi dengan menggunakan pemodelan simpower pada Matlab, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.14. Algoritma *modified firefly* akan mengatur *duty cycle* dari konverter boost tanpa menggunakan sensor mekanik. Penggunaan sensor tegangan dan arus dapat meningkatkan akurasi sistem dibandingkan dengan sensor mekanik. Pada algoritma *modified firefly*, *duty cycle* merepresentasikan posisi kunang-kunang dan daya keluaran penyearah yang didapatkan dari pengukuran tegangan dan arus keluaran penyearah, merepresentasikan tingkat kecerahan kunang-kunang. Posisi kunang-kunang yang lebih rendah nilai dayanya akan mendekati posisi kunang-kunang yang lebih tinggi nilai dayanya berdasarkan persamaan 4.19.

Pada penelitian ini, dua modifikasi yang dilakukan pada algoritma kunang-kunang. Kecepatan kunang-kunang untuk mendapatkan posisi tergantung pada nilai α dan β_m . Modifikasi pertama melalui nilai α yang akan di perbaharui untuk tiap iterasi berdasarkan persamaan

$$\alpha_t = \alpha_{t-1} \times 0.97^k \quad (4.20)$$

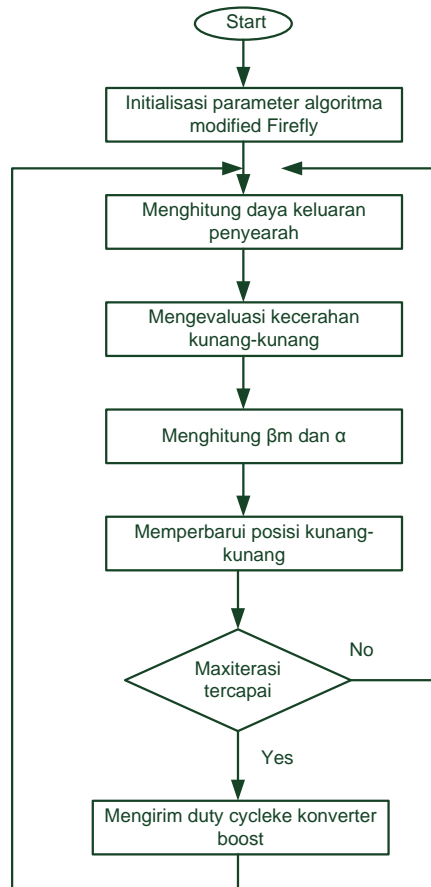
Dimana α_{t-1} merupakan parameter acak sebelumnya dan k merupakan jumlah iterasi. Semakin besar nilai α maka gerakan kunang-kunang akan semakin menyebar dan membuat konvergen semakin lama. Oleh karena itu pada

penelitian ini nilai α terus diperbarui, semakin besar iterasi maka nilai α harus semakin kecil karena pencarian mendekati penyelesaian optimal. Selain itu algoritma akan mengevaluasi kecerahan kunang-kunang berdasarkan daya keluaran maksimum. Posisi kunang-kunang setelah diperbaharui dapat dinyatakan dengan

$$X_i = X_i + \exp(\gamma \times r^2) \times (x_i - x_j) + \alpha_t \times (\text{randn} - 0.4) \quad (4.21)$$

Diagram alir algoritma *modified firefly* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.15 yang terdiri dari beberapa tahapan yaitu

- Langkah 1 : inisialisasi parameter *modified firefly*. Jumlah kunang-kunang yang digunakan dalam algoritma menentukan waktu komputasi. Semakin besar jumlah kunang-kunang maka waktu komputasi akan semakin lama. Oleh karena itu pada penelitian ini menggunakan jumlah kunang-kunang sebanyak 10. Nilai $\beta_o = 1$, $\gamma = 1,15$ dan $\alpha_0 = 0,009$
- Langkah 2 : Mengukur tegangan dan arus keluaran penyearah dan menghitung daya konverter dengan menggunakan persamaan $P_{dc} = V_{dc} \cdot I_{dc}$
- Langkah 3 : Mengevaluasi kecerahan setiap kunang-kunang, yang merupakan daya keluaran konverter, dengan menentukan nilai maksimum.
- Langkah 4 : Menentukan nilai β_m menggunakan persamaan 4.18 dan nilai α menggunakan persamaan 4.20 .
- Langkah 5 : Memperbaharui posisi kunang-kunang menggunakan persamaan 4.21.
- Langkah 6 : Menentukan apakah iterasi sudah mencapai maksimum jika belum akan mengulang ke langkah 2 dan berhenti hingga mencapai konvergen dan mencapai solusi optimal
- Langkah 7 : Mengirim *duty cycle* ke konverter boost.

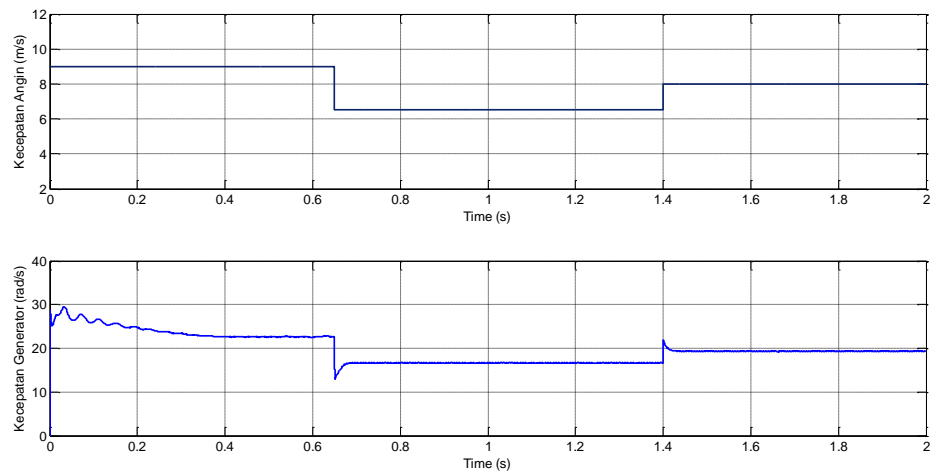


Gambar 4. 15 Diagram Alir Algoritma *Modified Firefly*

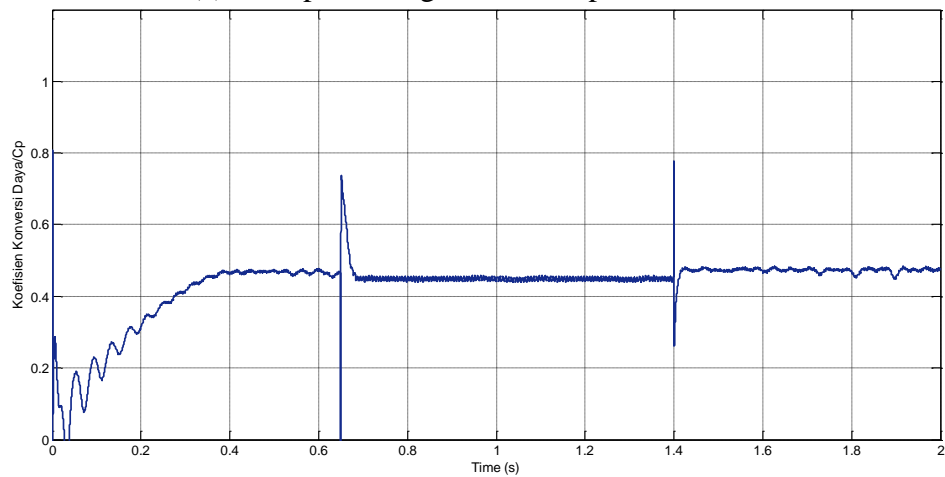
4.5.2 Hasil Simulasi Ekstraksi Daya Maksimum Dengan *Modified Firefly*

Algoritma *modified firefly* yang telah direncanakan pada sub bab sebelumnya divalidasi melalui simulasi dengan menggunakan SimPower Matlab. Simulasi dilakukan dengan memberikan variasi kecepatan angin seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.16. Variasi kecepatan angin diberikan sebesar 9m/s kemudian berubah menjadi 6,5m/s dan meningkat kembali menjadi 8m/s, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.16a. Untuk mendapatkan titik daya maksimum, algoritma *modified firefly* akan mengatur *duty cycle* untuk konverter boost berdasarkan tegangan dan arus keluaran rangkaian penyearah. Perubahan *duty cycle* pada konverter akan menghasilkan perubahan kecepatan rotor PMSG seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.16a. Titik daya maksimum tercapai jika turbin angin bekerja pada koefisien daya optimal. Penggunaan algoritma *modified*

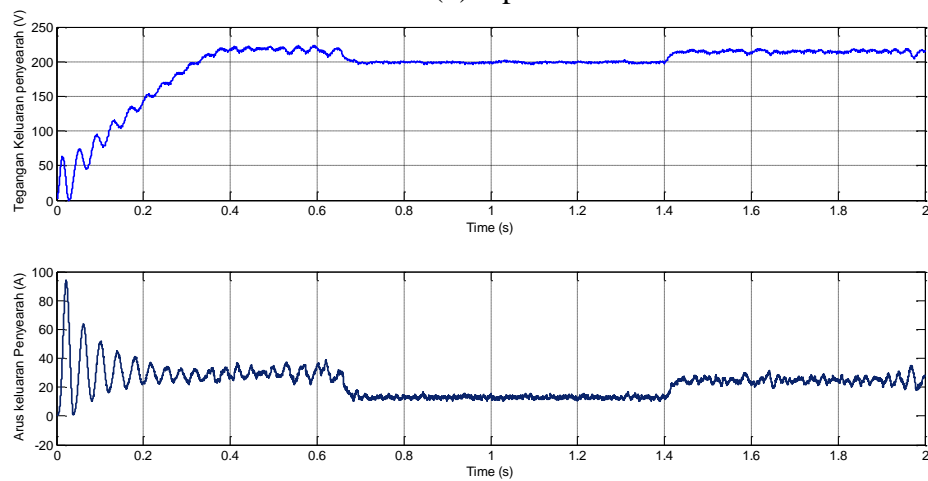
firefly dapat mempertahankan koefisien konversi daya (C_p) konstan sebesar 0,48, walaupun terjadi variasi kecepatan angin, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.16b.



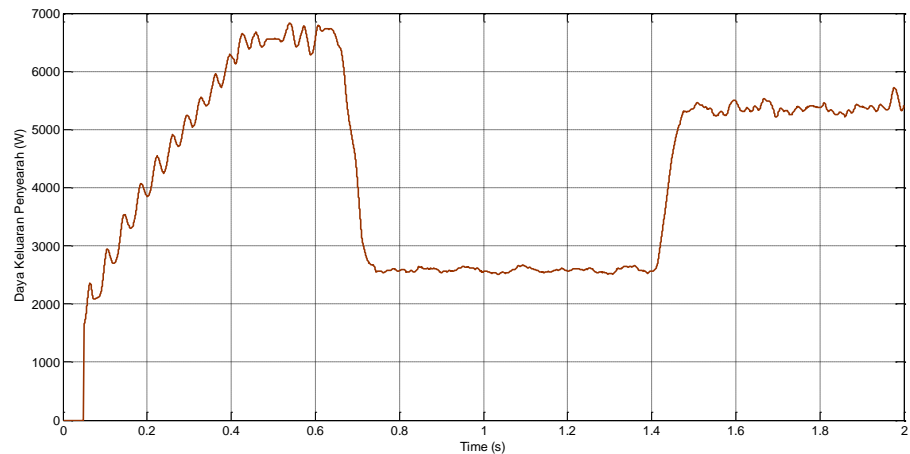
(a) Kecepatan Angin dan Kecepatan Generator



(b) C_p



(c) Tegangan dan Arus Keluaran Penyearah



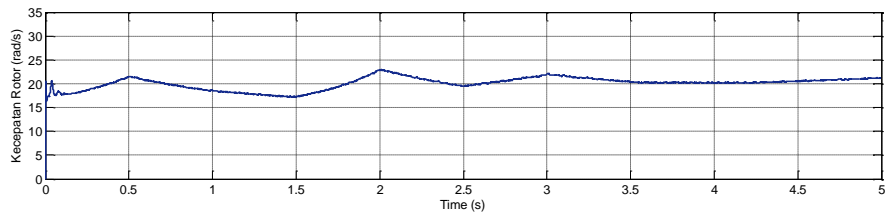
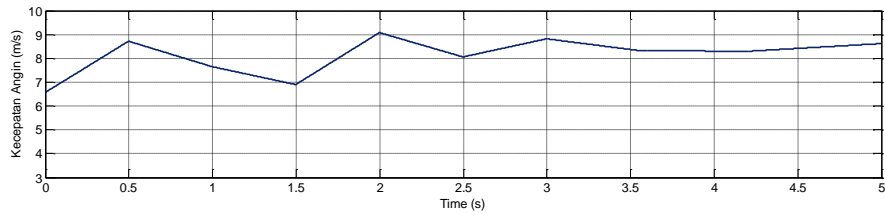
(d) Daya Keluaran Penyearah

Gambar 4. 16 Hasil Simulasi *Modified Firefly* Dengan perubahan Kecepatan Angin Step

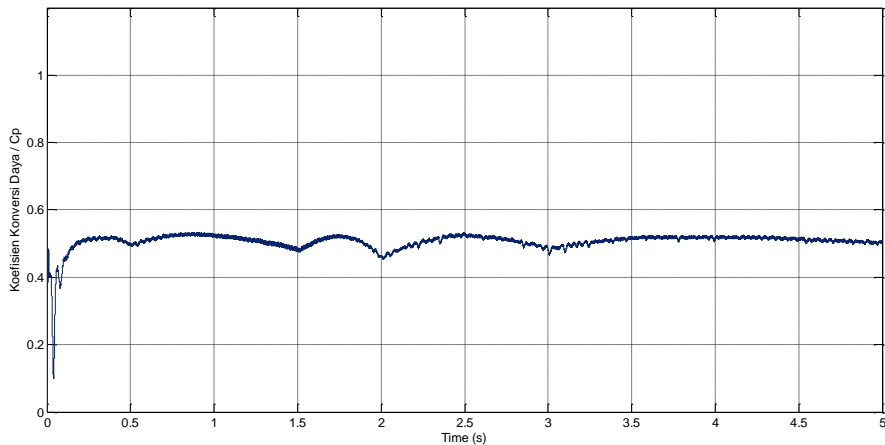
Gambar 4.16c menunjukkan tegangan dan arus keluaran rangkaian penyearah serta daya keluaran yang dihasilkan rangkaian penyearah. Seperti yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya jika kecepatan generator sebanding dengan keluaran penyearah. Peningkatan kecepatan rotor akan menghasilkan peningkatan tegangan keluaran generator sehingga tegangan keluaran dan daya keluaran yang dihasilkan penyearah juga akan meningkat. Kecepatan rotor PMSG berputar pada kecepatan optimal sehingga daya keluaran penyearah yang dihasilkan juga akan optimal. Berdasarkan respon transient, perubahan kecepatan angin dari 0 hingga 9m/s menghasilkan *settling time* sebesar 0,4s. Semakin kecil perubahan angin maka *settling time* juga akan semakin kecil. Pada kecepatan angin sebesar 9m/s, 6,5m/s dan 8m/s akan menghasilkan daya keluaran penyearah sebesar 6,5kW, 2,5kW dan 5,3kW.

Berdasarkan hasil pengukuran kecepatan angin, perubahan kecepatan angin di Indonesia sangat fluktuatif sehingga algoritma *modified firefly* juga diuji untuk variasi kecepatan angin yang berfluktuatif seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.17a. Variasi kecepatan angin diberikan secara acak dengan jangkauan 6m/s hingga 9m/s, dengan perubahan ini kecepatan rotor juga mengikuti perubahan tersebut. Penggunaan *modified firefly* dapat mencapai titik daya maksimum, hal ini dapat terlihat pada koefisien konversi energi, C_p yang dapat dipertahankan konstan pada nilai 0,48, seperti yang ditunjukkan pada Gambar

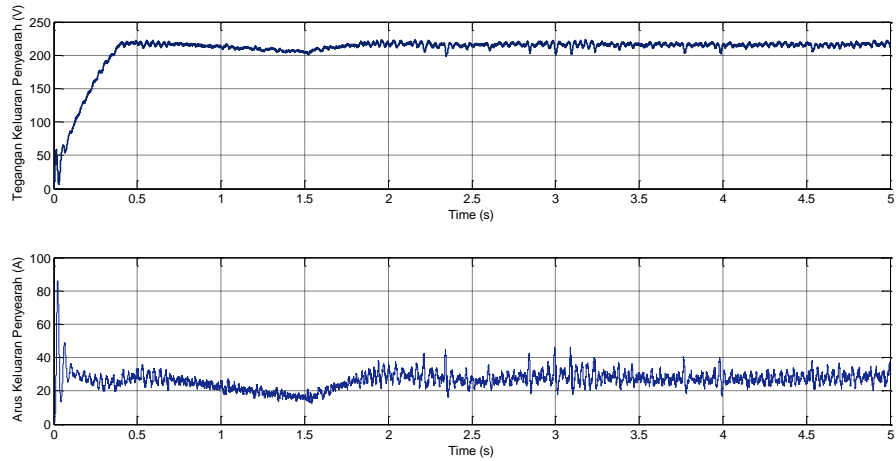
4.17b. Walaupun pada setiap perubahan kecepatan angin terdapat perubahan namun dapat dikembalikan pada nilai optimalnya. Daya keluaran penyearah ditunjukkan pada Gambar 4.17d, dimana tegangan dan daya yang dihasilkan juga berfluktuatif mengikuti kecepatan angin dan daya yang dihasilkan merupakan daya optimal dari kecepatan angin tertentu.



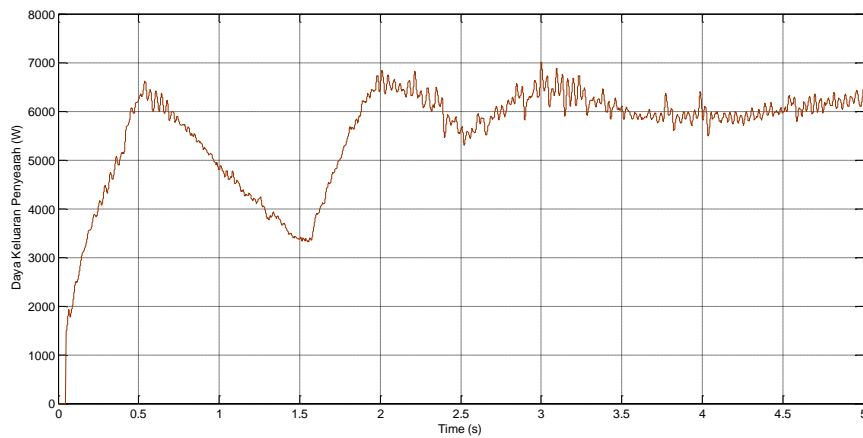
(a) Kecepatan Angin dan Kecepatan Generator



(b) Cp



(c) Tegangan dan Arus Keluaran Penyearah



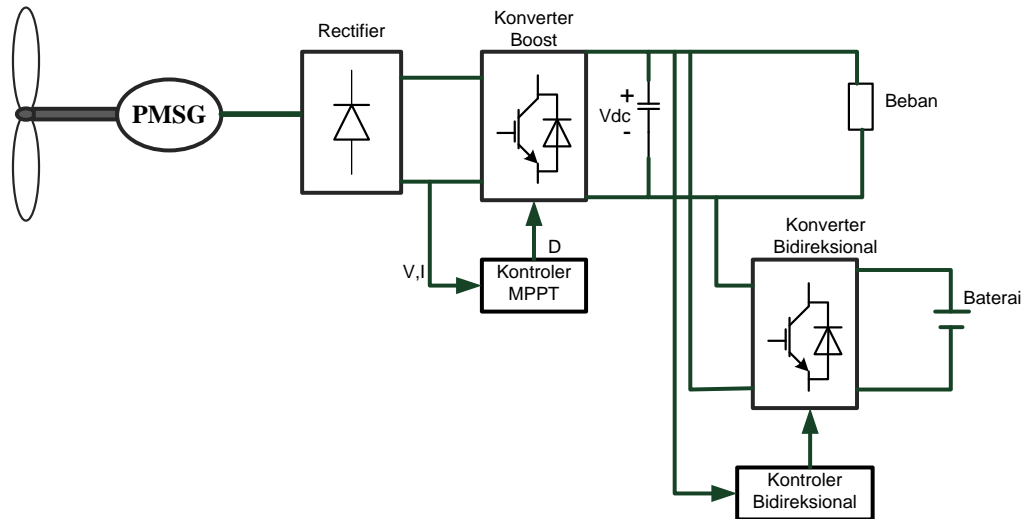
(d) Daya Keluaran Penyearah

Gambar 4. 17 Hasil Simulasi *Modified Firefly* Dengan perubahan Kecepatan Angin Acak

4.6 Ekstraksi Daya Maksimum Pada PMSG *Wind turbine Stand alone*

Seperti yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya bahwa kecepatan angin di Indonesia termasuk kecepatan angin menengah. Selain itu sebagai negara kepulauan masih banyak terdapat pulau-pulau kecil yang belum terjangkau oleh grid. Untuk daerah terpencil dan jauh dari grid, sistem turbin angin skala kecil stand alone dengan baterai sebagai penyimpan energi yang umumnya digunakan [100]. Parameter penting yang harus diperhatikan pada SKEA skala kecil yaitu biaya peralatan yang rendah dengan efisiensi yang maksimal. Gambar 4.18 Menunjukkan SKEA skala kecil pada aplikasi off grid atau *standalone*. Sistem

SKEA *stand alone* terdiri dari rangkaian penyearah, konverter boost, kontroler MPPT, konverter bidireksional, kontroler konverter bidireksional, beban dan baterai sebagai penyimpan energi. Sepertinya halnya pada SKEA yang terhubung ke grid, kontroler MPPT berfungsi untuk mengekstrak daya maksimum berdasarkan tegangan dan arus keluaran penyearah tanpa menggunakan sensor mekanik.



Gambar 4. 18 Sistem Konversi Energi Angin *Stand alone*

Variasi kecepatan angin akan menghasilkan daya yang variasi pula pada beban, sehingga untuk mendapatkan tegangan yang konstan pada beban dapat digunakan baterai sebagai penyimpan energi. Jika daya yang dihasilkan oleh generator lebih besar dibandingkan daya yang dibutuhkan beban maka akan disimpan pada baterai melalui konverter bidireksional yang dikontrol oleh kontroler. Demikian pula sebaliknya, baterai akan mensuplai beban jika daya yang dihasilkan lebih rendah dari kebutuhan beban. Kontroler bidireksional berfungsi untuk mengatur konverter bidireksional sehingga tegangan DC pada beban dapat dipertahankan konstan. Penjelasan detail mengenai konverter dan kontroler bidireksional terdapat pada bab selanjutnya.

4.7 Ekstraksi Daya Maksimum Dengan Algoritma *Modified Perturb&Observe*

Seperti yang telah pada sub bab sebelumnya, metode P&O merupakan metode yang paling banyak digunakan untuk mengekstrak daya maksimum pada turbin angin. Namun penggunaan metode ini sangat ditentukan oleh *step size*. Semakin besar nilai *step size* akurasi semakin turun dan memperbesar osilasi di sekitar titik daya maksimum. Demikian pula sebaliknya nilai *step size* yang kecil akan meningkatkan akurasi pencarian namun waktu komputasi semakin lama dan sulit untuk konvergen. Untuk itu telah dikembangkan metode berdasarkan metode P&O tersebut.

Mahdi [86] memodifikasi algoritma P&O dengan melakukan penalaan secara otomatis pada *step size* dan periode pengamatan sehingga dapat mengatasi kelemahan metode P&O. Berdasarkan hasil eksperimen, algoritma dapat memaksimalkan daya maksimum yang dapat ditangkap dengan kondisi kecepatan angin yang bervariasi. Namun pada metode ini algoritma dibangun dengan menggunakan kecepatan rotor sehingga membutuhkan sensor mekanik untuk mendeteksi hal tersebut. Hal ini tentunya akan menambah biaya sistem dan mengurangi akurasi sistem. Padmanabham [100] menggunakan algoritma P&O sebagai MPPT berdasarkan daya keluaran penyearah, arus dan tegangan *dc link* yang dihasilkan. Variabel keluaran dari algoritma ini adalah arus induktor referensi yang menjadi acuan pada kontroler PI. Kontroler PI akan menghasilkan *duty cycle* untuk konverter boost sehingga turbin angin dapat bekerja pada titik daya maksimum. Berdasarkan hasil simulasi metode ini menentukan titik daya maksimum terhadap variasi kecepatan angin. Walaupun algoritma ini tidak menggunakan informasi kecepatan angin dan kecepatan generator, namun penggunaan kontroler PI membutuhkan penentuan parameter PI yang tidak mudah. Hal yang sama juga dilakukan oleh Mahdi [82] dimana algoritma dengan modifikasi P&O digunakan sebagai observer TSR dan digunakan sebagai referensi untuk kontroler PI. Kontroler PI akan menghasilkan *duty cycle* untuk konverter boost.

Harrag [101] melakukan modifikasi metode P&O dengan menggunakan algoritma genetika untuk menentukan *step size* pada algoritma P&O untuk sistem

fotovoltaik. Algoritma genetika (GA) digunakan secara paralel dengan kontroler PID, dimana GA digunakan untuk menala parameter kontroler PID dan kontroler PID akan menghasilkan *step size* untuk metode P&O. Penggunaan GA dan kontroler PID menambah kompleksitas sistem, membutuhkan memori yang lebih besar dan meningkatkan biaya sistem. Chen[13] memodifikasi algoritma P&O dengan menggunakan kontroler PI untuk mendapatkan nilai *duty cycle*. Pada algoritma ini menggunakan parameter daya dan tegangan *dc link* sebagai variabel masukan, tanpa menggunakan sensor mekanik. Namun penggunaan kontroler PI membutuhkan penentuan parameter kontroler yang sesuai dan tidak mudah dalam penentuannya.

Fathabadi [102] juga menggunakan variabel masukan daya keluaran penyearah untuk memodifikasi metode P&O. *Step size* dari *duty cycle* yang dihasilkan ditentukan berdasarkan perbandingan antara selisih daya keluaran dan selisih arus keluaran. Nilai *step size* terdiri dari empat pilihan yang masing-masing pilihan tergantung pada nilai perbandingan daya dan arus. Metode ini cukup sederhana dan mudah diimplementasikan, namun perubahan nilai *step size* yang ditentukan berupa nilai konstanta membutuhkan penentuan yang tepat. Hal yang sama juga dilakukan oleh Fathabadi[103] pada penelitian yang sama, namun pada paper ini menggunakan kecepatan rotor sebagai variabel masukan sehingga menambah biaya peralatan. Hui[76] memodifikasi algoritma P&O dengan mengubah *step size* secara adaptif berdasarkan slope antara daya dan tegangan penyearah. Liuying[104] menggunakan perbandingan antara daya keluaran dan kecepatan rotor untuk mengubah *step size* pada algoritma P&O. Berdasarkan hasil simulasi algoritma dapat bekerja dengan baik, namun penggunaan sensor kecepatan menambah biaya peralatan dan mengurangi efisiensi.

4.7.1 Algoritma *Modified Perturb & Observe* (P&O)

Pada penelitian ini menggunakan *modified* P&O sebagai MPPT untuk SKEA *stand alone* dimana algoritma di uji dengan menggunakan perangkat lunak simulasi Matlab Simulink. Modifikasi metode P&O untuk mengubah *step size* secara adaptif berdasarkan daya keluaran penyearah dan nilai *duty cycle*

sebelumnya. Seperti telah dijelaskan pada bab sebelumnya, pengaturan kecepatan PMSG berhubungan dengan tegangan keluaran penyearah. Berdasarkan persamaan 3.32 yang menyatakan hubungan antara tegangan keluaran penyearah dan kecepatan rotor (ω) bukan merupakan persamaan garis lurus karena terdapat nilai resistansi dan induktansi lilitan. Pada penelitian ini MPPT didesain tanpa menggunakan pengukuran kecepatan rotor dan kecepatan angin, sehingga untuk menyederhanakan desain kontrol akan lebih baik jika menggunakan pendekatan garis lurus yang dapat dinyatakan dengan persamaan

$$V_{dc} = K_r \cdot \omega \quad (4.22)$$

Dimana K_r merupakan konstanta pendekatan. Modifikasi algoritma P&O dilakukan berdasarkan kurva karakteristik MPPT antara daya keluaran penyearah dan kecepatan generator seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.19, dimana daya keluaran penyearah sama dengan daya masukan konverter boost. Untuk pencarian titik daya maksimum, kurva karakteristik dapat dibagi menjadi tiga yaitu

Pada titik daya maksimum

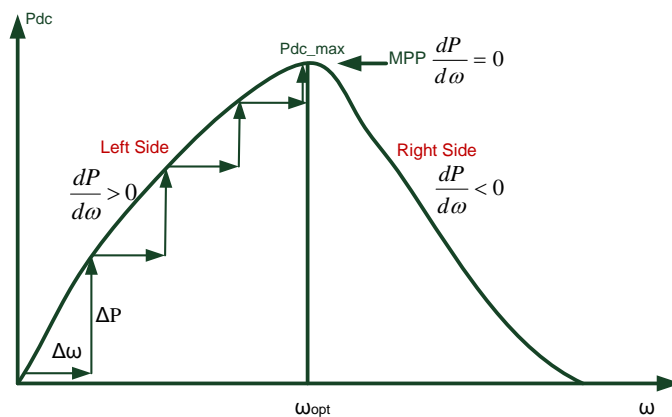
$$\frac{dP_{dc}}{d\omega} = 0 \quad (4.23)$$

Di sebelah kiri titik daya maksimum

$$\frac{dP_{dc}}{d\omega} > 0 \quad (4.24)$$

Di sebelah kanan titik daya maksimum

$$\frac{dP_{dc}}{d\omega} < 0 \quad (4.25)$$



Gambar 4. 19 Kurva Karakteristik Dari Tegangan Keluaran Penyearah Terhadap Kecepatan Generator

Berdasarkan hubungan antar variabel dan *chain rule* maka dapat ditentukan

$$\frac{dP_{dc}}{d\omega} = \frac{dP_{dc}}{dD} \cdot \frac{dD}{dV_{dc}} \cdot \frac{dV_{dc}}{d\omega} = 0 \quad (4.26)$$

Dimana V_{dc} merupakan tegangan keluaran penyearah yang sama dengan tegangan masukan konverter boost. Berdasarkan persamaan 3.35, *duty cycle* dari konverter dapat dinyatakan dengan

$$D = 1 - \frac{V_{dc}}{V_{out}} \quad (4.27)$$

Perubahan *duty cycle* terhadap perubahan tegangan keluaran penyearah dapat dinyatakan dengan

$$\frac{dD}{dV_{dc}} = - \frac{1}{V_{out}} \neq 0 \quad (4.28)$$

Jika tegangan keluaran penyearah sebanding dengan kecepatan generator maka

$$\frac{dV_{dc}}{d\omega} = K_r > 0 \quad (4.29)$$

Berdasarkan persamaan 4.26 hingga 4.29 maka dapat disimpulkan

$$\frac{dP_{dc}}{d\omega} \leq \Rightarrow \frac{dP_{dc}}{dD} = 0 \quad (4.30)$$

Berdasarkan persamaan 4.26 Maka dD/dV_{dc} selalu bernilai negatif dan $dP_{dc}/d\omega$ selalu berlawanan tanda dP_{dc}/dD sehingga akan mengakibatkan perubahan nilai *duty cycle* yang berlawanan dengan perubahan kecepatan generator. Semakin besar *duty cycle* maka kecepatan generator akan semakin turun. Slope perubahan dP_{dc}/dD dapat dinyatakan dengan

$$\frac{dP_{dc}}{dD} \approx \frac{\Delta P_{dc}}{\Delta D} \quad (4.31)$$

$$\Delta P_{dc} = V_{dc}(k)I_{dc}(k) - V_{dc}(k-1)I_{dc}(k-1) \quad (4.32)$$

$$\Delta D = D(k) - D(k-1) \quad (4.33)$$

Dimana $V_{dc}(k)$ merupakan tegangan keluaran penyearah untuk pengambilan data ke-k, $I_{dc}(k)$ merupakan tegangan keluaran penyearah untuk pengambilan data ke-k, dan $D(k)$ merupakan nilai *duty cycle* pada iterasi ke-k. Tegangan dan arus keluaran penyearah diukur melalui sensor arus dan tegangan. Diagram alir untuk *modified P&O* yang dikembangkan pada penelitian ini, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.20. Algoritma akan menghitung daya yang dihasilkan penyearah, perbedaan daya keluaran penyearah dan perbedaan *duty cycle*. Berdasarkan perbedaan antara daya dan *duty cycle* dapat dibagi menjadi tiga yaitu

- Pada sisi sebelah kiri, dP_{dc}/dD memiliki nilai negative dengan dua kemungkinan yaitu $dP_{dc} > 0$ dan $dD < 0$ dimana SKEA beroperasi mendekati MPP atau $dP_{dc} < 0$ dan $dD > 0$ dimana sistem menjauhi MPP. Untuk mencapai MPP maka kecepatan generator harus dinaikkan dengan mengurangi arus masukan konverter boost sehingga *duty cycle* harus diturunkan yang dapat dinyatakan dengan persamaan.

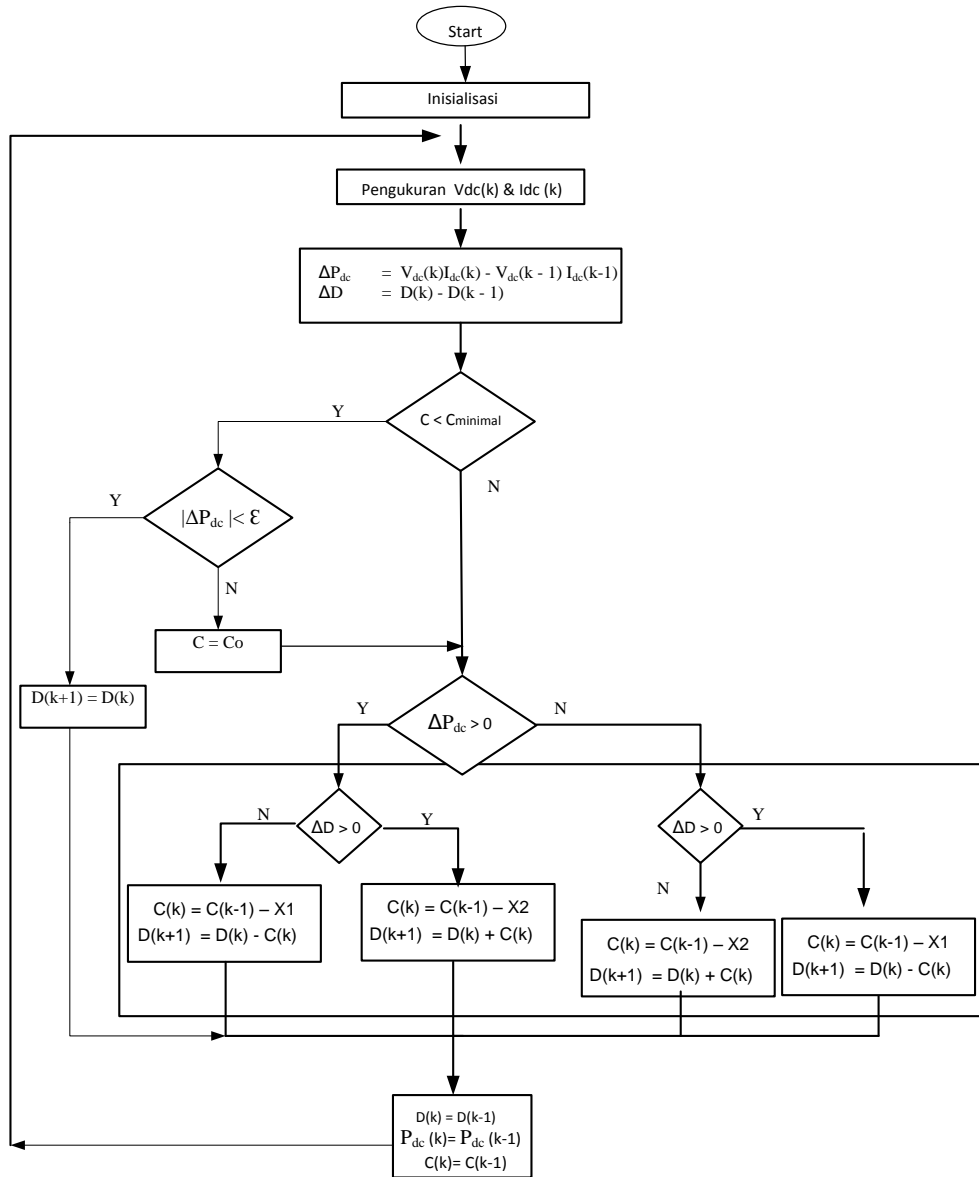
$$D(k+1) = D(k) - C \quad (4.34)$$

- Pada sebelah kanan dari MPP, dP_{dc}/dD memiliki tanda positif dengan dua kemungkinan yaitu $dP_{dc} < 0$ dan $dD < 0$ dimana sistem beroperasi mendekati MPP atau $dP_{dc} > 0$ dan $dD > 0$ dimana pencarian menjauhi MPP. Oleh karena itu untuk mencapai MPP maka kecepatan generator harus diturunkan dengan meningkatkan arus masukan konverter melalui kenaikan *duty cycle* yang dapat dinyatakan dengan persamaan

$$D(k+1) = D(k) + C \quad (4.35)$$

- Pada posisi di MPP, $dP_{dc}/dD = 0$ sehingga tidak dibutuhkan perubahan kecepatan generator dan *duty cycle* dipertahankan pada

$$D(k+1) = D(k) \quad (4.36)$$



Gambar 4. 20 Diagram Alir *Modified P&O*

Dimana C merupakan *step size* atau perubahan *duty cycle*. Modifikasi yang dilakukan pada algoritma *modified P&O* adalah memperbaharui nilai C secara kontinyu berdsarkan jumlah iterasi yang dapat dinyatakan dengan

$$C(k) = C(k-1) - X \quad (4.37)$$

Dimana X merupakan faktor modifikasi. Untuk mempercepat waktu pencarian, jika nilai C dibawah nilai minimum (ϵ) sebesar 0.002 dan ΔP belum mendekati minimum maka hal ini menunjukkan daya maksimum belum tercapai sehingga nilai C akan di atur pada nilai awal hingga daya maksimum dicapai dan

duty cycle yang didapat dipertahankan. Semakin besar iterasi maka nilai daya mendekati nilai maksimum dan membutuhkan perubahan arus konverter yang semakin kecil pula sehingga nilai C juga harus semakin kecil. Nilai C diperbaharui dengan konstanta tertentu berdasarkan posisi slope dP_{dc}/dD . Berdasarkan kurva karakteristik dari turbin angin, bagian sisi sebelah kiri memiliki slope yang lebih kecil dibanding sebelah kanan sehingga bagian sebelah kiri membutuhkan perubahan *duty cycle* yang lebih kecil dibanding sebelah kanan untuk mencapai titik daya maksimum. Oleh karena itu faktor modifikasi untuk sisi sebelah kiri lebih besar dibandingkan dengan sebelah kanan yang dapat dinyatakan dengan

$$X_1 = 0,03 \quad \text{if } \frac{dP_{dc}}{dD} < 0 \quad (4.38)$$

$$X_2 = 0,02 \quad \text{if } \frac{dP_{dc}}{dD} > 0 \quad (4.39)$$

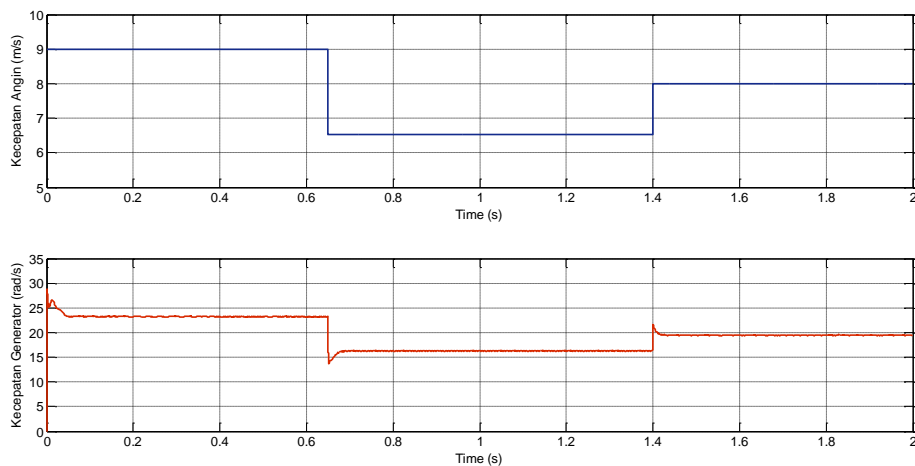
Modifikasi kedua pada algoritma *modified P&O* pada penelitian ini yaitu dengan memberikan batas ΔP minimum sehingga mengurangi osilasi. Jika ΔP lebih kecil dari nilai minimum maka nilai D yang dikirim sama dengan dengan nilai D sebelumnya. Dibandingkan dengan algoritma P&O konvensional, algoritma *modified P&O* memiliki kelebihan yaitu mengurangi osilasi pada saat daya maksimum tercapai karena adanya batas ΔP minimum. Selain itu dengan *step size* yang adaptif maka algoritma *modified P&O* ini lebih cepat mencapai titik daya maksimum dibandingkan metode P&O dimana memiliki *step size* yang konstan sehingga menimbulkan osilasi dan kecepatan untuk mencapai titik daya maksimum sangat tergantung pada *step size* yang dipilih.

4.7.2 Hasil Simulasi Ekstraksi Daya Maksimum Dengan *Modified Perturb & Observe (P&O)*

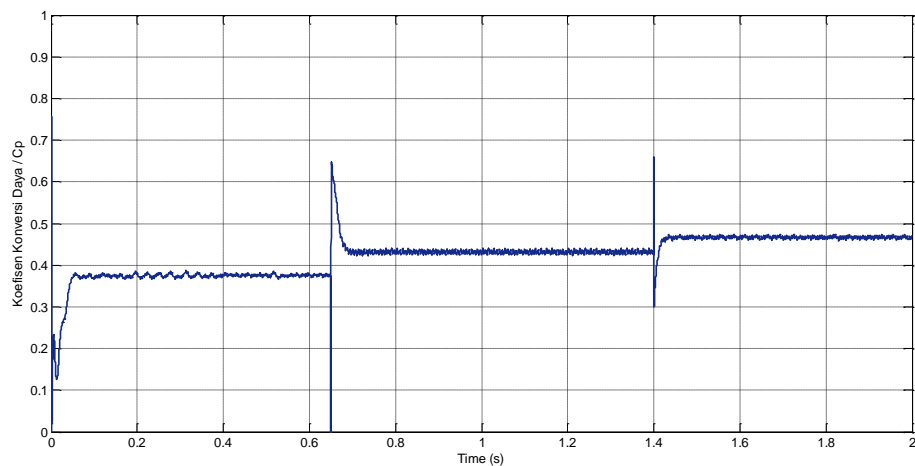
Algoritma *modified perturb & observe* diterapkan pada sistem turbin angin *stand alone*, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.18, untuk mengekstrak daya maksimum. Algoritma yang telah didesain akan diuji dengan menggunakan Simpower pada Simulink Matlab. Pengujian dilakukan dengan memberikan variasi kecepatan angin, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.21a. Algoritma *modified P&O* dapat mengatur kecepatan generator pada kecepatan optimal, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.21a, dimana pada setiap kecepatan angin

tertentu memiliki nilai kecepatan ptimal tertentu pula. Koefisien konversi daya (C_p) dapat mencapai nilai optimal dan dipertahankan konstan pada nilai optimal walaupun terjadi perubahan kecepatan angin. Gambar 4.21b menunjukkan koefisien konversi energi (C_p) yang dihasilkan oleh turbin angin yang menggunakan *modified* P&O sebagai MPPT. Nilai C_p dapat dipertahankan konstan pada 0,47 walaupun pada kecepatan angin 9m/s nilai yang dihasilkan belum mencapai nilai optimal.

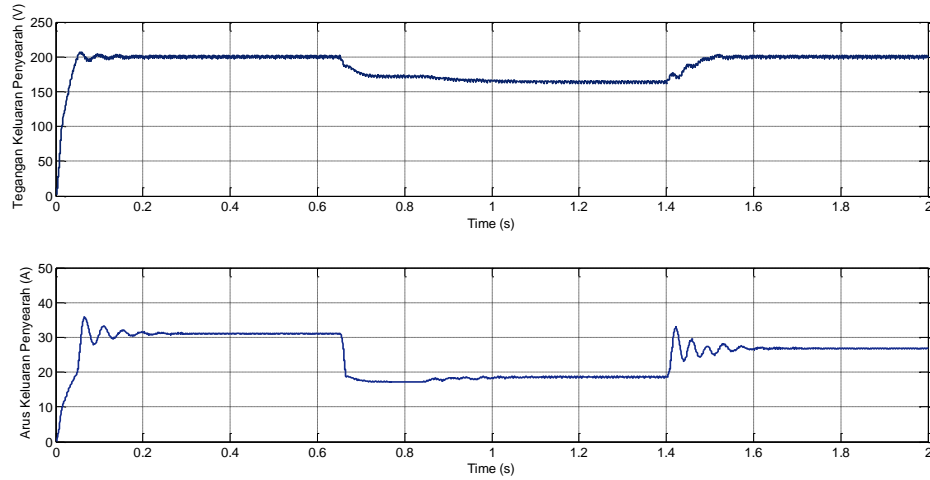
Gambar 4.21c menunjukkan tegangan dan arus keluaran penyearah sedangkan Gambar 4.21d menunjukkan daya keluaran penyearah. Semakin besar kecepatan angin maka daya keluaran penyearah yang dihasilkan juga akan semakin besar. Pada kecepatan angin 9m/s, 6,5m/s dan 8m/s akan menghasilkan daya keluaran penyearah sebesar 6100W, 2900W dan 5300W.



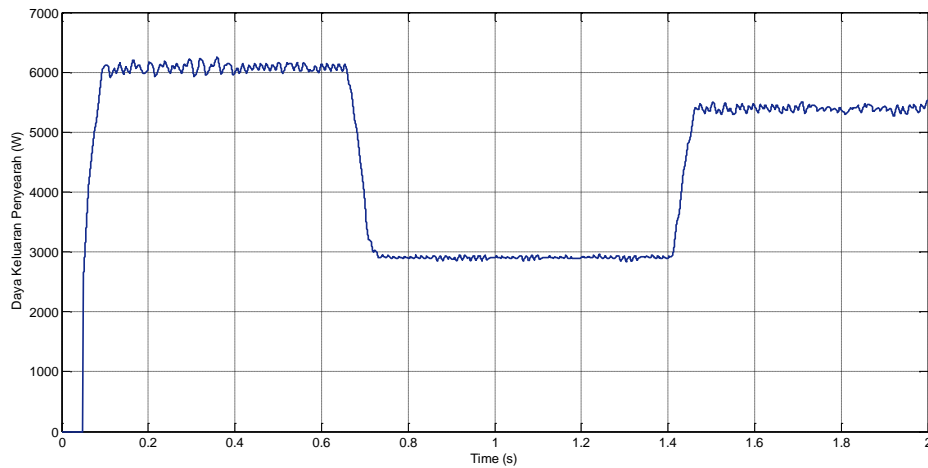
(a) Kecepatan Angin dan Kecepatan Generator



(b) C_p



(c) Tegangan dan Arus Keluaran Penyearah

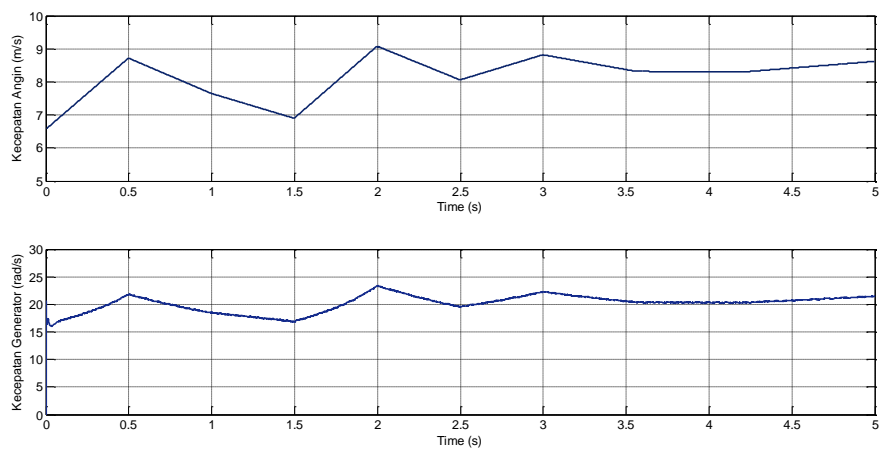


(d) Daya Keluaran Penyearah

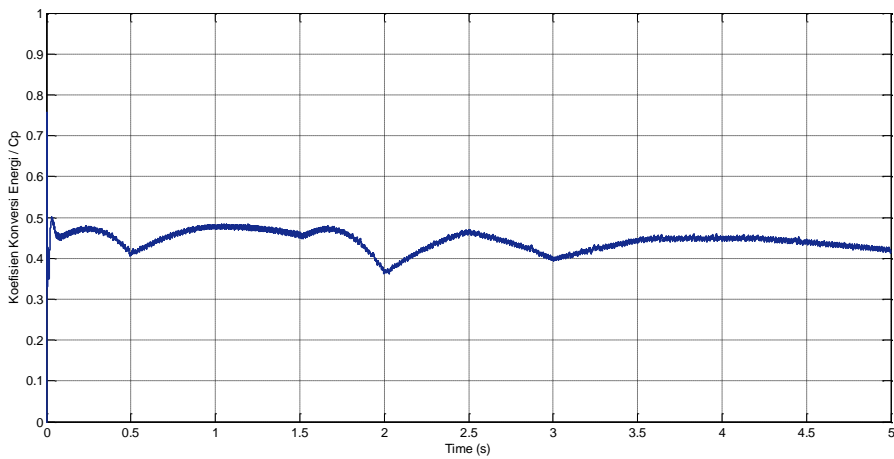
Gambar 4. 21 Hasil Simulasi Kontroler Fuzzy Dengan perubahan Kecepatan Angin Step

Performansi algoritma *modified* P&O untuk MPPT juga diujikan pada perubahan kecepatan angin acak dengan jangkauan 6,5m/s hingga 9m/s, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.22a. Kecepatan generator dapat berputar pada kecepatan optimal mengikuti perubahan kecepatan angin, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.22a. Hal ini dikarenakan algoritma *modified* P&O dapat mempertahankan nilai C_p pada nilai optimal terhadap perubahan kecepatan angin, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.22b. Walaupun pada perubahan kecepatan angin 9m/s, nilai c_p mengalami penurunan hingga mencapai 0,4 namun dapat ditingkatkan kembali mencapai nilai 0.48. Gambar 4.22c menunjukkan

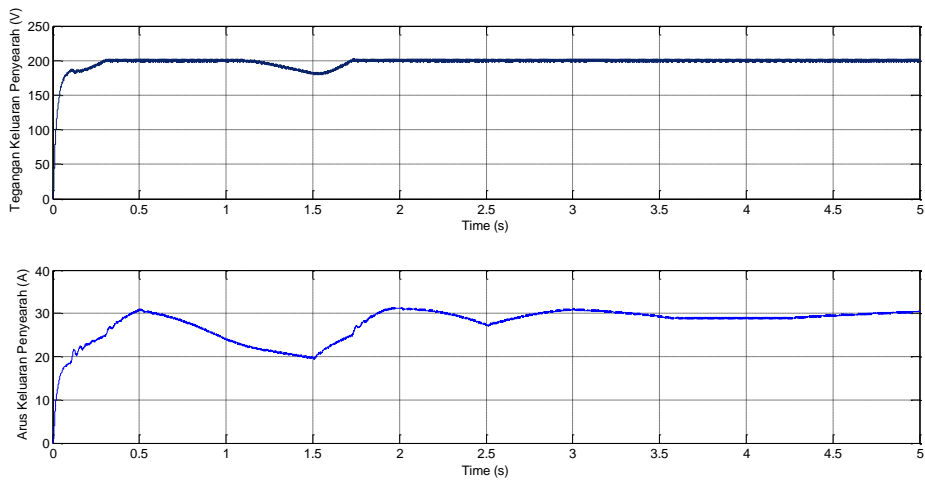
tegangan dan arus keluaran penyearah sedangkan daya keluaran penyearah ditampilkan pada Gambar 4.22d.



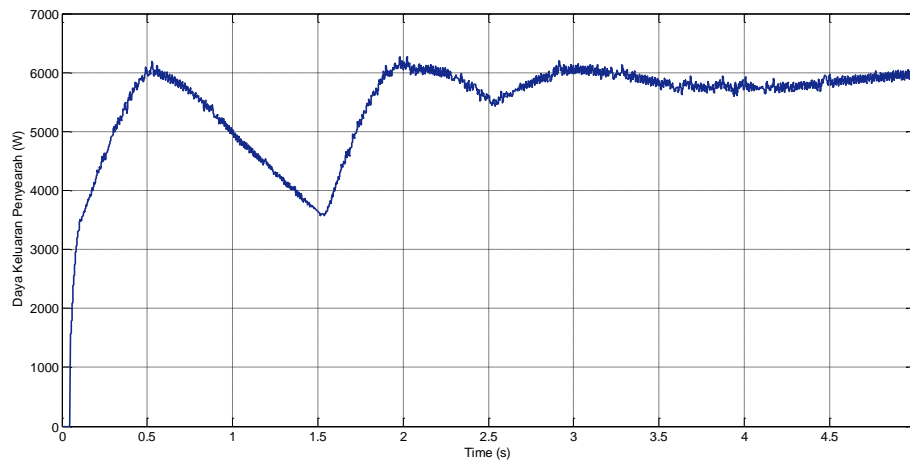
(a) Kecepatan Angin dan Kecepatan Generator



(b) C_p



(c) Tegangan dan Arus Keluaran Penyearah



(d) Daya Keluaran Penyearah

Gambar 4. 22 Hasil Simulasi Kontroler Fuzzy Dengan perubahan Kecepatan Angin Acak

4.8 Ekstraksi Daya Maksimum Dengan Algoritma Logika Fuzzy

Dari beberapa algoritma yang digunakan untuk mengekstrak daya maksimum pada turbin angin, algoritma P&O merupakan algoritma yang paling banyak digunakan karena kesederhanaan dan kemudahan dalam implementasinya dengan akurasi yang cukup tinggi. Penggunaan metode ini dapat mengurangi penggunaan sensor mekanik seperti anemometer untuk pengukuran kecepatan angin dan tachometer untuk pengukuran kecepatan rotor sehingga akurasi dapat ditingkatkan. Namun demikian penggunaan ini memiliki kekurangan karena sangat tergantung pada penentuan *step size*. Oleh karena itu, beberapa penelitian dikembangkan dengan menggunakan kecerdasan buatan untuk mengekstrak daya angin. PSO dan *modified Firefly* sebagai salah satu telah digunakan pada SKEA yang terhubung ke grid, seperti yang telah dijelaskan sebelumnya. Logika fuzzy sebagai salah satu algoritma dari kecerdasan buatan telah banyak digunakan untuk mengatur sistem non linier.

Salomao [105] membandingkan performansi logika fuzzy yang digunakan untuk mengekstrak daya optimal pada turbin angin dengan sumbu horizontal dengan kontrol PI. Pengaturan daya optimal dilakukan melalui pengaturan sudut pitch. Logika fuzzy memiliki dua masukan yaitu kecepatan angin dan error yang

merupakan selisih antara referensi daya elektrik dan daya elektrik yang dihasilkan. Sedangkan keluaran logika fuzzy berupa sudut pitch. Berdasarkan hasil simulasi, kontroler logika fuzzy menghasilkan performansi yang lebih baik pada kecepatan rendah dibandingkan kontroler PI. Namun pengaturan daya optimal melalui pengaturan sudut pitch menyebabkan stress mekanik yang tinggi pada sistem dan meningkatkan biaya peralatan dan perawatan. Demikian pula Lakhal [106] menerapkan kontrol logika fuzzy sebagai MPPT pada turbin angin sumbu horizontal dengan menggunakan kecepatan angin dan kecepatan PMSG. Berdasarkan hasil simulasi, kontroler fuzzy dapat mengekstrak daya optimal dengan performansi yang baik. Namun kontroler ini membutuhkan kecepatan angin dan PMSG sehingga membutuhkan sensor mekanik untuk pengukuran variabel tersebut sehingga dapat mengurangi akurasi dan efisiensi dari sistem turbin angin keseluruhan. Selain itu juga meningkatkan biaya peralatan. Logika fuzzy juga telah digunakan pada sistem turbin angin yang terhubung ke grid dan dilengkapi dengan baterai sebagai penyimpan energi. Logika fuzzy digunakan untuk menentukan daya optimal berdasarkan tegangan dc link dan perbedaan tegangan dc link untuk mengatur duty cycle pada konverter boost. Berdasarkan simulasi, penggunaan logika fuzzy dapat menghasilkan daya optimal dengan tetap menstabilkan tegangan dc link dan mengurangi ketidakcocokan daya aktif pada keluaran inverter [107].

Joonmin [108] menerapkan logika fuzzy sebagai kontrol MPPT pada sistem turbin angin skala kecil dengan *switched mode rectifier* (SMR). Kontrol fuzzy mengatur *duty cycle* pada SMR dengan menghasilkan *step size* dari *duty cycle*. Performansi kontrol fuzzy divalidasi dengan menggunakan simulasi menggunakan PSIM dan eksperimen. Penggunaan kontrol fuzzy dengan SMR lebih efisien dan ekonomis dibandingkan dengan metode P&O. Sedangkan Aissaoui [109] menggunakan logika fuzzy pada turbin angin yang menggunakan generator induksi. Kontrol fuzzy digunakan untuk mengatur daya aktif dan reaktif melalui pengaturan inverter PWM. Dengan menggunakan error dan delta error sebagai masukan dan metode *centre of gravity* sebagai metode defuzzifikasi, logika fuzzy memiliki performansi yang cukup baik untuk mencapai nilai daya referensi.

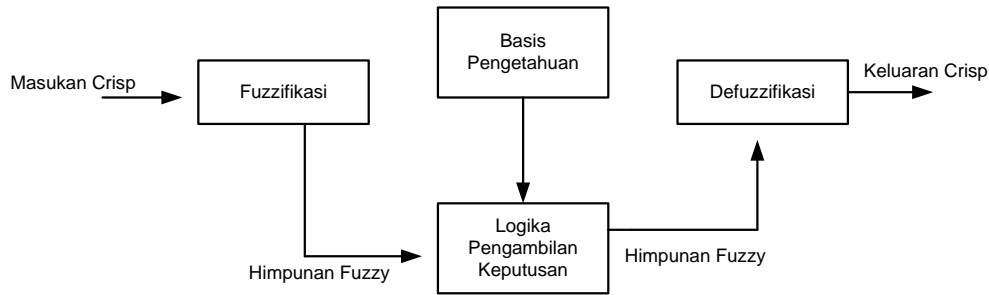
Yaakoubi [110] menerapkan kontrol logika fuzzy untuk mengekstrak daya optimal berdasarkan daya keluaran penyearah dan kecepatan rotasi PMSG. Performansi kontroler fuzzy di uji melalui simulasi dengan Matlab. Dibandingkan dengan metode P&O, kontroler fuzzy memiliki respon yang lebih cepat terhadap perubahan kecepatan angin untuk mengekstrak daya maksimum. Namun penggunaan kecepatan rotasi sebagai variabel masukan kontroler fuzzy menyebabkan sistem ini membutuhkan tachometer sebagai sensor mekanik sehingga meningkatkan biaya peralatan. Hal yang sama juga dilakukan oleh Petrila [111] yang menggunakan kontroler fuzzy pada turbin angin skala kecil dengan menggunakan variabel daya dan kecepatan rotasi PMSG. Penggunaan tachometer untuk pengukuran kecepatan rotasi mengurangi efisiensi dari sistem. Walaupun performansi dari penggunaan logika fuzzy sebagai MPPT memiliki hasil yang baik.

4.8.1 Logika Fuzzy

Konsep logika *fuzzy* yang pertama kali diperkenalkan oleh Lotfih Zadeh pada tahun 1965 yang dipergunakan untuk penanganan dan pemrosesan informasi yang bersifat linguistik. Faktor utama dalam logika fuzzy adalah:

- Nilai masukan dan keluaran serta semesta pembicaraan (*uiverse discourse*) masukan dan keluaran,
- Faktor penyekalaan variabel *input-output*,
- Fungsi keanggotaan Fuzzy yang digunakan dalam penyusunan nilai-nilai *fuzzy* untuk masing-masing variabel *input-output*, dan
- Basis aturan (*rule base*).

Fungsi kenggotaan logika fuzzy dapat didefinisikan secara numerik dan fungsional. Secara numerik apabila digunakan untuk merepresentasikan himpunan fuzzy pada domain diskrit, sedangkan secara fungsional jika setiap elemen di himpunan semesta memiliki nilai keanggotaan. Fungsi keanggotaan ditentukan secara subyektif dan tentunya pemilihan fungsi keanggotaan akan mempengaruhi sistem fuzzy secara keseluruhan. Terdapat beberapa fungsi keanggotaan fuzzy yang biasa digunakan yaitu fungsi S, fungsi π , fungsi trapezium, fungsi triangular.



Gambar 4. 23 Konfigurasi Dasar Sistem Logika Fuzzy

Sebuah konfigurasi dasar sistem logika fuzzy ditunjukkan pada Gambar 4.23 , yang terdiri dari empat komponen utama, yaitu fuzzyfikasi, basis pengetahuan, *rule base*, dan defuzzyfikasi [112][106]. Fuzzyfikasi merupakan suatu proses yang mengkonversi nilai numerik masukan ke dalam bilangan fuzzy dengan nilai antara 0 hingga 1 dengan menggunakan fungsi keanggotaan fuzzy. Logika fuzzy disusun berdasarkan intuisi dan pengetahuan operator manusia, perancang maupun peneliti. Oleh karena itu pengetahuan tersebut disimpan dalam sebuah data base dan *rule* yang berisi deskripsi variabel masukan dan keluaran menggunakan himpunan fuzzy. Basis aturan (*fuzzy rule*) adalah aturan-aturan *fuzzy* yang merelasikan dua atau lebih variabel *fuzzy*. Aturan *fuzzy* ini biasanya berbentuk “jika x adalah A maka y adalah B.” Bentuk tersebut sangat umum, tetapi variabel *fuzzy* dapat lebih banyak, itulah sebabnnya aturan *fuzzy* sering disebut *fuzzy IF-THE rule*. Bentuk umumnya adalah

$$R^i : \text{if } u_1 \text{ is } F_n^i \text{ then } Y_1 \text{ is } G_1^i \text{ and } \dots \text{and } y_n \text{ is } G_l^i \quad (4.40)$$

Aturan-aturan *fuzzy* tersebut digunakan untuk memperoleh keputusan yang didasarkan pada pertimbangan kualitatif dari hasil proses pengumpulan informasi linguistik yang berbasis pengalaman dan intuisi subyektif [109-110][36]. Terdapat dua metode untuk menyusun aturan fuzzy (*fuzzy rules*), yaitu metode heuristic dan metode deterministik. Metode heuristic berdasarkan pada pengetahuan terhadap tingkah laku sistem. Sedangkan metode deterministik berdasarkan tujuan pengendalian.

Dengan basis aturan *fuzzy* maka himpunan *fuzzy* dalam himpunan semesta masukan yang terdapat dalam bagian alasan (*premise*) telah dipetakan pada himpunan *fuzzy* lain yang berada dalam himpunan semesta keluaran yang terdapat

pada bagian akibat (*consequent*). Proses ini sering disebut sebagai *inferensi fuzzy*. Proses *inferensi fuzzy* membutuhkan seluruh bagian yang telah dijelaskan diatas, yaitu: *membership function*, operator *fuzzy*, dan *if-then rules*. Inferensi dengan teknik grafis dengan perhitungan secara manual dengan melibatkan jumlah *rule* yang terbatas dan mempermudah proses inferensi telah ditawarkan. Metode *inferensi fuzzy* yang sering digunakan yang sering digunakan , yaitu: Metode *inferensi fuzzy* MAX-MIN dan Metode *inferensi fuzzy* MAX-DOT.

Sistem *fuzzy* dengan dua masukan x dan y (*antecedent*) dan satu keluaran z (*consequent*) dengan r basis *rule* mempunyai rumusan sebagai berikut:

$$\text{IF } x \text{ is } A_k \text{ and } y \text{ is } B_k \text{ THEN } z \text{ is } C_k \text{ untuk } k = 1, 2, \dots, r \quad (4.41)$$

Dengan A_k dan B_k adalah *fuzzy set* yang menggambarkan pasangan *antecedent* ke- k , dan C_k adalah *fuzzy set* yang menggambarkan *consequent* ke- k .

Untuk sistem *fuzzy* dengan 2 basis *rule*, maka dapat dirumuskan

$$\text{Rule1 IF } x \text{ is } A_1 \text{ and } y \text{ is } B_1 \text{ THEN } z \text{ is } C_1 \quad (4.42)$$

$$\text{Rule2 IF } x \text{ is } A_2 \text{ and } y \text{ is } B_2 \text{ THEN } z \text{ is } C_2 \quad (4.43)$$

Bila masukan yang diberikan adalah x_0 dan y_0 , maka *fire strength* α_1 dan α_2 dari basis *rule* dinotasikan sebagai berikut

$$\alpha_1 = \mu_{A1}(x_0) \wedge \mu_{B1}(y_0) \quad (4.44)$$

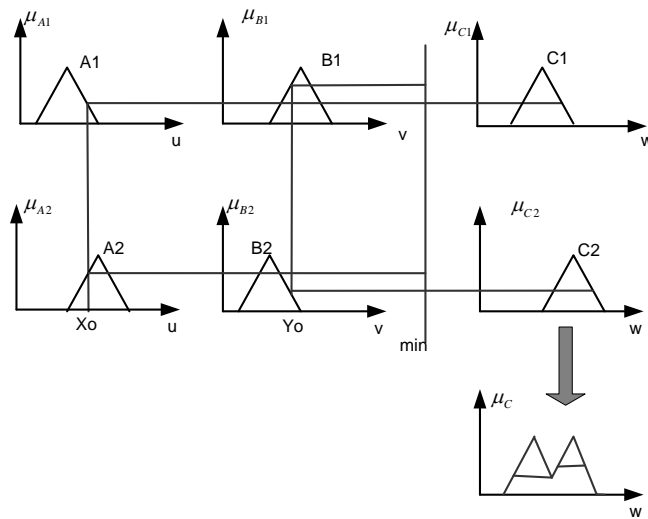
$$\alpha_2 = \mu_{A2}(x_0) \wedge \mu_{B2}(y_0) \quad (4.45)$$

➤ Metode inferensi fuzzy MAX-MIN

Metode ini menggunakan *fuzzy reasoning* minimum Mamdani sebagai implikasi *fuzzy*, aksi kontrol (*control decition*) untuk *rule* ke- i adalah $\alpha_i \wedge \mu_{Ci}(w)$, maka penyokong aksi atur atau himpunan *fuzzy* untuk *consequent* C dirumuskan sebaagai berikut

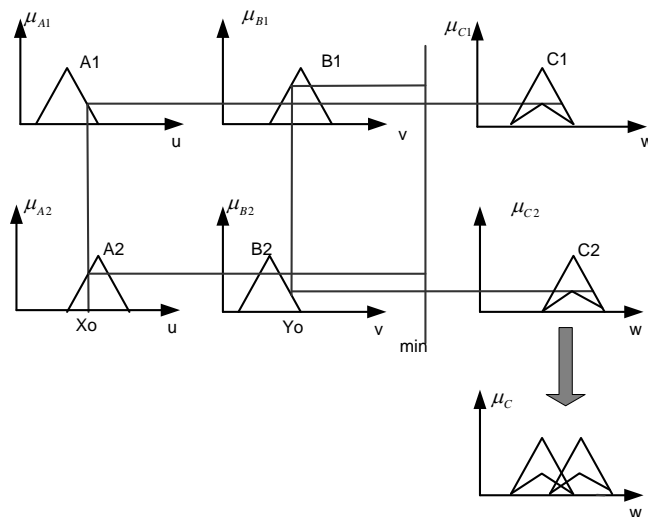
$$\mu_C(w) = (\alpha_1 \wedge \mu_{C1}(w)) \vee (\alpha_2 \wedge \mu_{C2}(w)) \quad (4.46)$$

proses inferensi MAX-MIN dengan masukan crips x_0 dan y_0 dengan metode grafis ditunjukkan dalam Gambar 4.24



Gambar 4. 24 Inferensi Fuzzy MAX-Min dengan Masukan Crisp

➤ Metode inferensi *fuzzy* MAX-DOT



Gambar 4. 25 Inferensi Fuzzy MAX-DOT dengan Masukan Crisp

Metode ini menggunakan *fuzzy Larsen's product* sebagai implikasi *fuzzy*, aksi kontrol (*control dicision*) untuk rule ke-i adalah $\alpha_i \cdot \mu_{Ci}(w)$, maka penyokong aksi atur atau himpunan fuzzy untuk *consequent* C dirumuskan sebagai berikut

$$\mu_C(w) = (\alpha_1 \cdot \mu_{C1}(w)) \vee (\alpha_2 \cdot \mu_{C2}(w)) \quad (4.47)$$

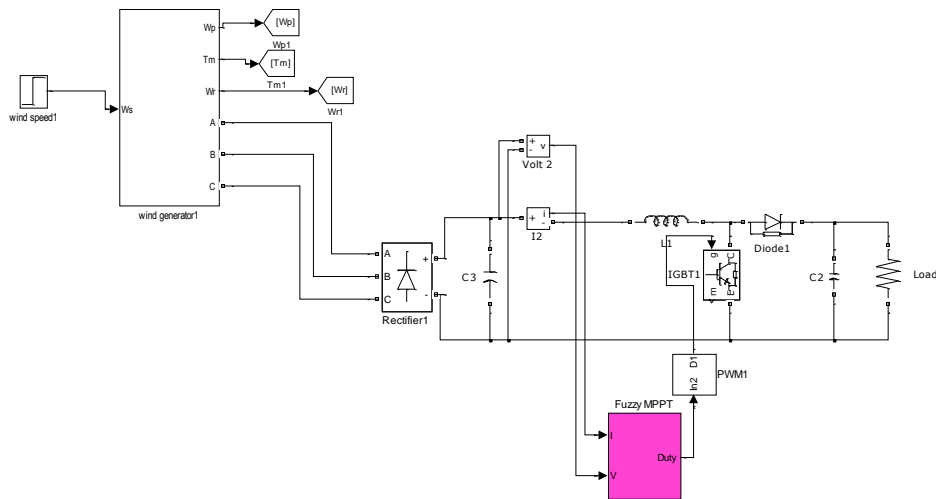
Proses *inferensi* MAX-DOT dengan masuka crips x_0 dan y_0 dengan metode grafis ditunjukkan dalam Gambar 4.25

Defuzzifikasi merupakan proses pemetaan himpunan fuzzy ke himpunan crisp. Proses ini merupakan kebalikan dari proses fuzzyfikasi berfungsi untuk mengubah keluaran linguistik ke dalam sinyal keluaran crisp (non fuzzy). Metode defuzzyfikasi yang paling banyak digunakan yaitu metode nilai maksimum (*mean of maximum/* MOM) dan *center of gravity* (COG) [39]. Strategi MOM menghasilkan nilai pertengahann untuk seluruh aksi kontrol lokal yang memiliki jangkauan fungsi keanggotaan maksimum. Apabila jumlah rule dinotasikan sebagai n , puncak maksimum fungsi keanggotaan fuzzy set untuk *consequent* pada rule ke- i dinotasikan dengan nilai tegas H_i dan nilai kontrol tegas untuk semesta pembicaraan dinotasikan sebagai W_i , *fire strenght* untuk rule ke- i dinotasikann sebagai α_i . sehingga nilai kontrol tegas W hasil defuzzifikasi dengan metode MOM diberikan oleh:

$$W = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i H_i W_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i H_i} \quad (4.48)$$

Sedangkan metode COG menghasilkan titik pusat untuk kemungkinan distribusi aksi atur. Untuk sistem MISO, apabila jumlah rule dinotasikan sebagai n , *moment* fungsi keanggotaan dari fuzzy set untuk *consequent* pada rule ke- i dinotasikan sebagai M_i dan luas areanya dinotasikan sebagai A_i , dan *fire strenght* untuk rule ke- i dinotasikan sebagai α_i . sehigga nilai kontrol tegas W hasil defuzzifikasi dengann metode COG diberikan oleh:

$$W = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i M_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i A_i} \quad (4.49)$$



Gambar 4. 26 Model SKEA Untuk Implementasi MPPT dengan Logika Fuzzy

Pada penelitian ini logika fuzzy diterapkan pada sistem konversi energi angin *off-grid* yang terdiri dari turbin angin, PMSG, rangkaian penyearah dioda, konverter boost dan beban, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.26 . Logika fuzzy berfungsi sebagai kontroler MPPT berdasarkan daya keluaran penyearah dan tegangan keuaran dc dari penyearah. Untuk menguji validasi dari algoritma fuzzy, pemodelan dilakukan dengan menggunakan blok SimPower dan fuzzy pada Simulink Matlab. Pada sistem ini, logika fuzzy memiliki dua masukan yaitu dP dan dV. dP merupakan perbedaan antara daya saat ini dan sebelumnya dima daya merupakan perkalian antara tegangan dan arus keluaran penyearah. Sedangkan dV merupakan perbedaan antara tegangan keluaran penyearah saat ini dan sebelumnya, yang dapat dinyatakan [113]

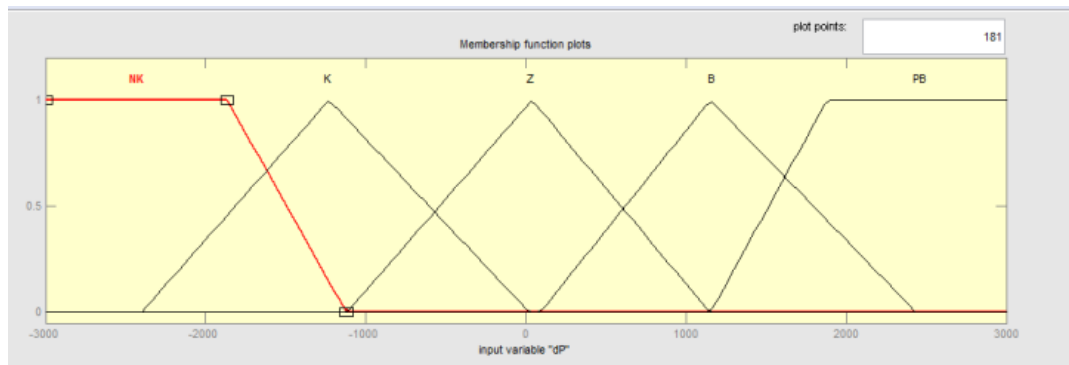
$$P = V.I \quad (4.50)$$

$$dV = V(n) - V(n-1) \quad (4.51)$$

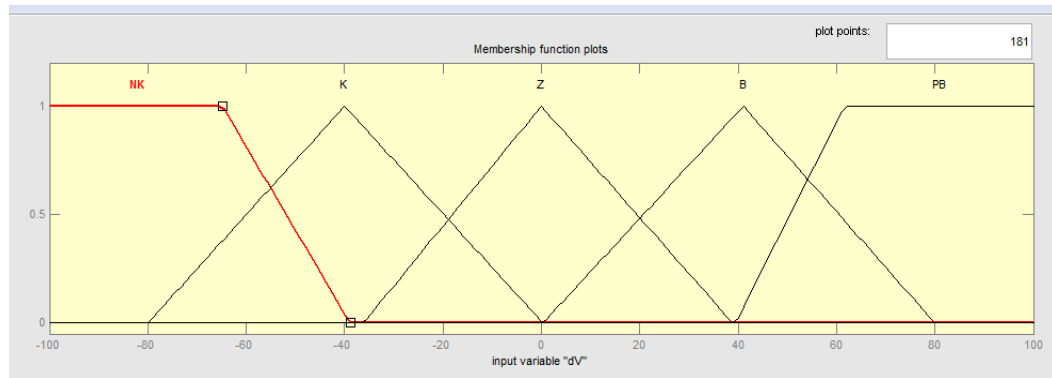
$$dP = P(n) - P(n-1) \quad (4.52)$$

Setiap masukan logika fuzzy, yaitu dP dan dV, memiliki lima fungsi keanggotaan yang terdiri dari tiga fungsi keanggotaan triangular dan dua fungsi keanggotaan trapezium. Tiga fungsi keanggotaan triangular memiliki nilai fuzzy Negative (K), Zero (Z) dan Positive (P), yang diapit oleh dua fungsi keanggotaan

trapezium yang memiliki nilai fuzzy Negative small (NK) dan positive big (PB), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.27.



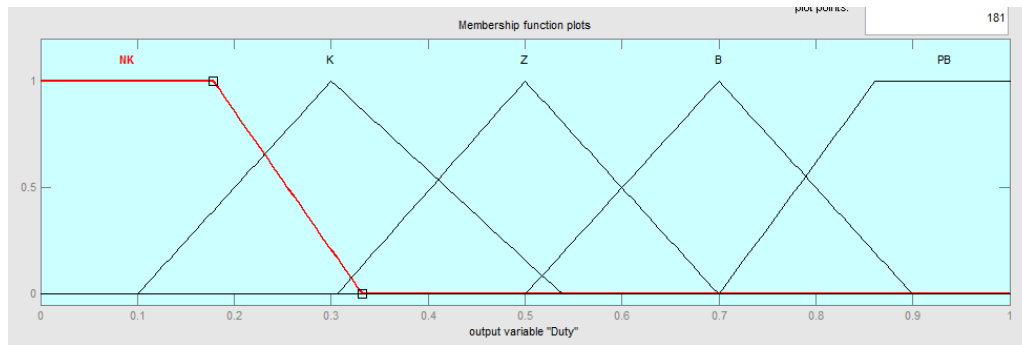
(a) Masukan Kontroler MPPT Fuzzy dP



(b) Masukan Kontroler MPPT Fuzzy dV

Gambar 4. 27 Fungsi Keanggotaan Masukan Kontroler MPPT Fuzzy

Untuk mengekstrak daya maksimum, PMSG harus berputar pada kecepatan optimum yang dapat dicapai melalui pengaturan duty cycle untuk konverter boost. Sehingga keluaran logika fuzzy merupakan duty cycle yang akan dikirim ke konverter boost. Fungsi keanggotaan untuk keluaran logika fuzzy juga memiliki 5 fungsi keanggotaan yang terdiri dari tiga fungsi keanggotaan triangular dan dua fungsi keanggotaan trapezium. Tiga fungsi keanggotaan triangular memiliki nilai fuzzy Negative (K), Zero (Z) dan Positive (P), yang diapit oleh dua fungsi keanggotaan trapezium yang memiliki nilai fuzzy Negative small (NK) dan positive big (PB), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.28 [113] .



Gambar 4. 28 Fungsi Keanggotaan Keluaran Kontroler MPPT Fuzzy

Aturan fuzzy menunjukkan hubungan antara variabel masukan dan keluaran fuzzy yang disusun berdasarkan pengetahuan ekstraksi daya maksimum dan kurva karakteristik MPPT turbin angin. Jika nilai dP positif dan dV memiliki nilai positif maka turbin angin beroperasi di sebelah kanan titik daya maksimum sehingga kecepatan rotor harus dinaikkan dengan menurunkan duty cycle. Demikian pula sebaliknya jika perbandingan dP dan dV negatif maka turbin angin beroperasi di sebelah kanan titik daya maksimum sehingga kecepatan rotor harus diturunkan dengan menaikkan duty cycle. Aturan fuzzy seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.1[113].

Tabel 4. 1 Aturan Fuzzy

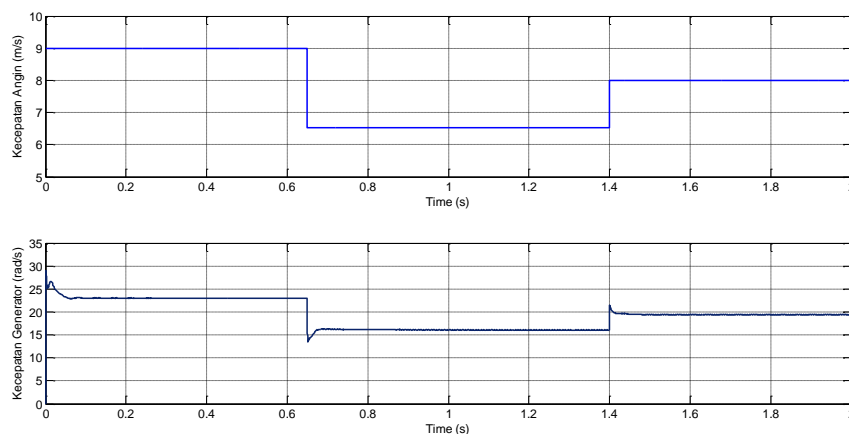
Output		dV				
		NK	K	Z	P	PB
dP	NK	NK	K	K	B	PB
	K	K	K	K	B	PB
	Z	Z	Z	Z	B	B
	P	B	B	K	K	NK
	PB	PB	B	K	K	NK

Berdasarkan *rule fuzzy* kontroler fuzzy menggunakan metode max-min untuk *inference engine*. Proses defuzzifikasi yang akan mengubah nilai fuzzy dari duty cycle menjadi nilai numeric dengan jangkauan nilai duty cycle sebesar 0 – 1.

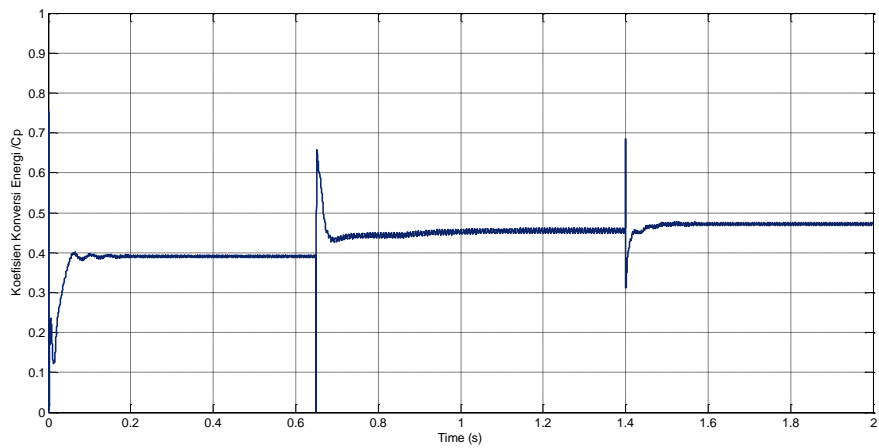
Proses defuzzifikasi menggunakan metode *center of gravity* dengan persamaan 4.49.

4.8.2 Hasil Simulasi Ekstraksi Daya Maksimum Dengan Logika Fuzzy

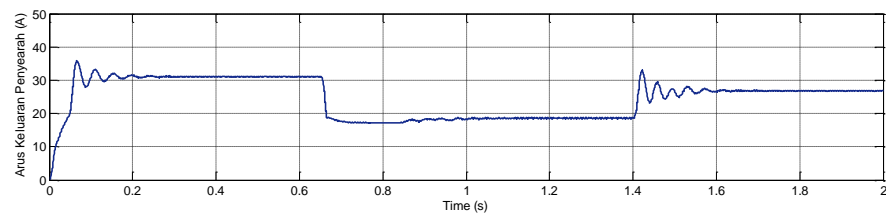
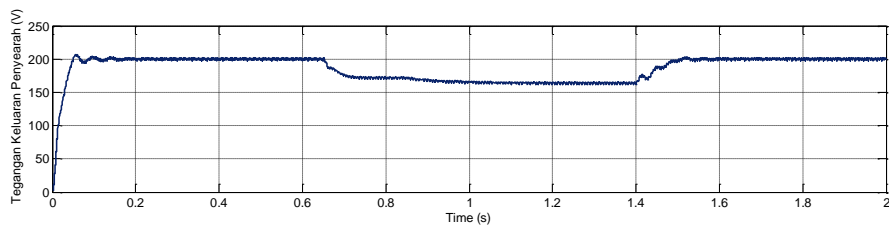
Algoritma logika fuzzy sebagai kontroler MPPT pada sistem turbin angin *stand alone*, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.18, diuji dengan menggunakan Simpower pada Matlab untuk mengetahui performansi algoritma. Pengujian dilakukan dengan memberikan variasi kecepatan angin dari 6,5m/s hingga 9m/s, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.29a. Algoritma fuzzy dapat mencari titik daya maksimum jika dapat mempertahankan koefisien konversi daya (C_p) pada nilai optimal terhadap variasi kecepatan angin. Gambar 4.29b menunjukkan koefisien konversi energi (C_p) yang dihasilkan oleh turbin angin yang menggunakan kontroler fuzzy sebagai MPPT. Kontroler fuzzy dapat mengatur turbin angin bekerja pada titik daya maksimum dengan mempertahankan C_p pada nilai optimal sebesar 0,48 walaupun kecepatan angin berubah. Namun pada kecepatan angin 9m/s di awal simulasi, C_p yang dicapai masih dibawah nilai optimal yaitu hanya 0,4. Pencapaian nilai C_p pada nilai optimal maka PMSG akan berputar pada kecepatan optimal pula seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.29a. Perubahan kecepatan PMSG akan mengikuti perubahan kecepatan angin.



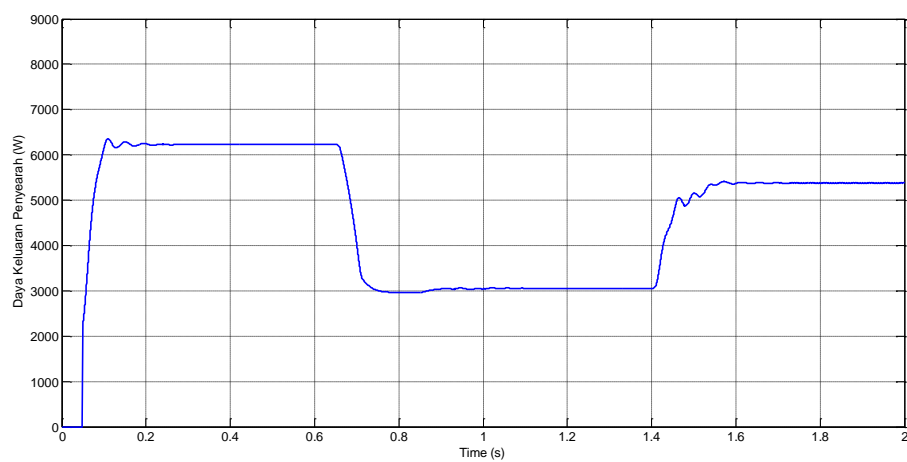
(a) Kecepatan Angin dan Kecepatan Generator



(b) C_p



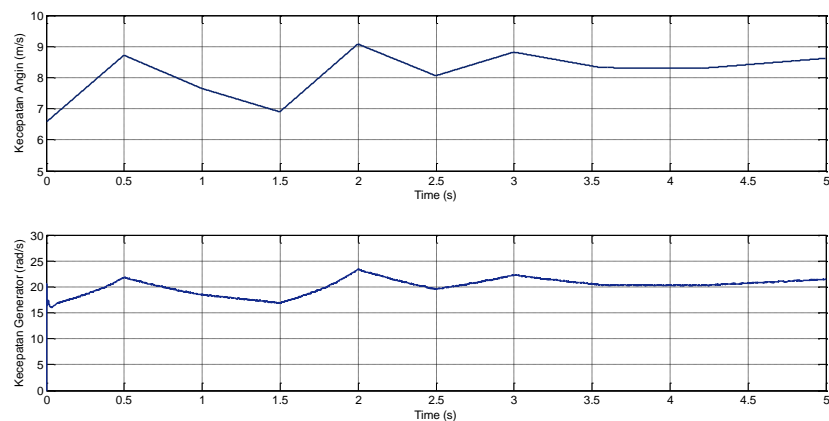
(c) Tegangan dan Arus Keluaran Penyearah



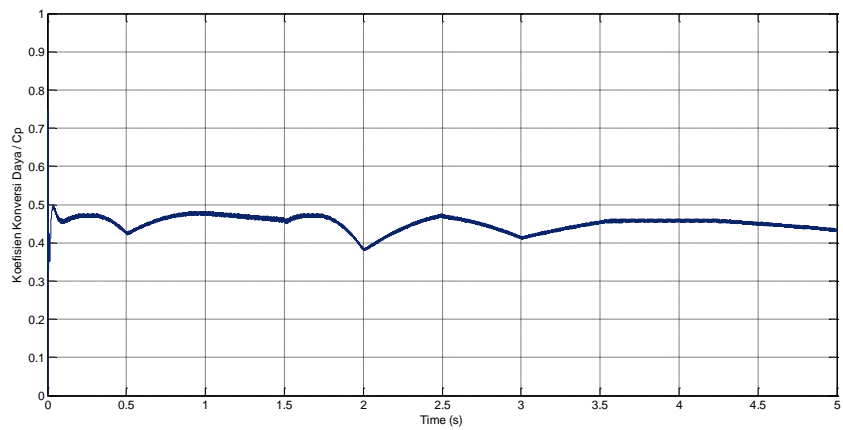
(d) Daya Keluaran Penyearah

Gambar 4. 29 Hasil Simulasi Kontroler Fuzzy Dengan perubahan Kecepatan Angin Step

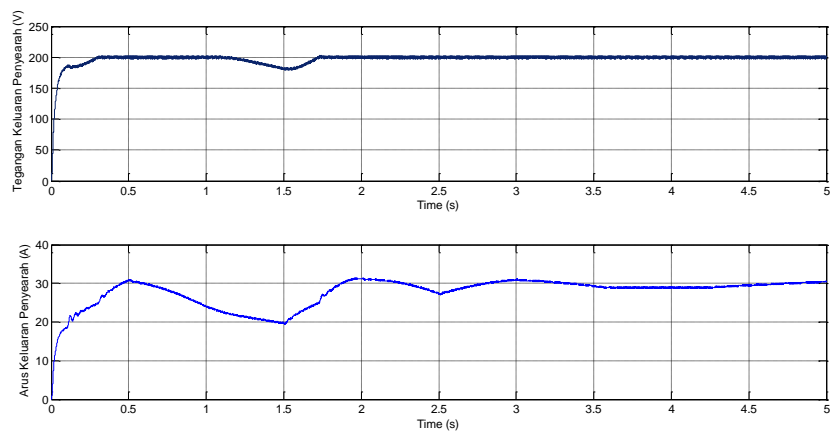
Gambar 4.29c menunjukkan tegangan dan arus keluaran penyearah sedangkan gambar 4.29d menunjukkan daya keluaran penyearah. Semakin besar kecepatan angin maka daya keluaran penyearah yang dihasilkan juga akan semakin besar. Pada kecepatan angin 9m/s, 6,5m/s dan 8m/s akan menghasilkan daya keluaran penyearah sebesar 6100W, 3000W dan 5300W. Performansi algoritma fuzzy untuk MPPT juga diujikan pada perubahan kecepatan angin acak dengan jangkauan 6,5m/s hingga 9m/s, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.30a. Kecepatan generator dapat berputar pada kecepatan optimal mengikuti perubahan kecepatan angin, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.30a. Hal ini dikarenakan kontroler fuzzy dapat mempertahankan nilai C_p pada nilai optimal terhadap perubahan kecepatan angin, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.30b. Walaupun pada perubahan kecepatan angin 9m/s, nilai C_p mengalami penurunan hingga mencapai 0,4 namun dapat ditingkatkan kembali mencapai nilai 0,48. Gambar 4.30c menunjukkan tegangan dan arus keluaran penyearah sedangkan daya keluaran penyearah ditampilkan pada Gambar 4.30d.



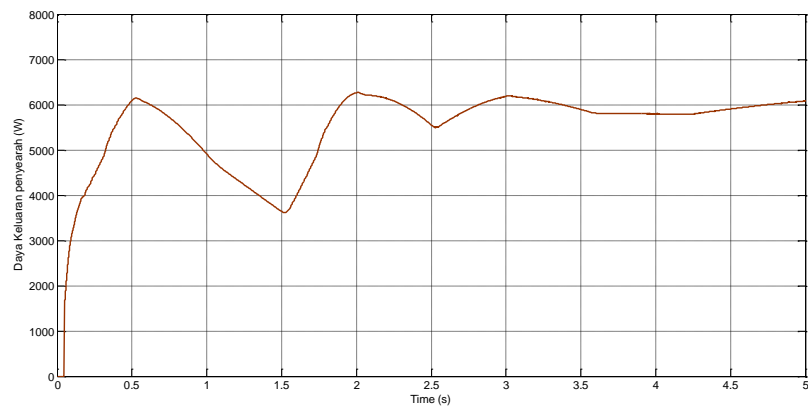
(a) Kecepatan Angin dan Kecepatan Generator



(b) C_p



(c) Tegangan dan Arus Keluaran Penyearah



(d) Daya Keluaran Penyearah

Gambar 4. 30 Hasil Simulasi Kontroler Fuzzy Dengan perubahan Kecepatan Angin Acak

4.9 Perbandingan Metode Optimasi Untuk Ekstraksi Daya Maksimum

Beberapa metode untuk mengekstrak daya maksimum pada sistem turbin angin telah dijelaskan. Menurut [37], metode untuk mengekstrak daya maksimum secara umum dapat dikategorikan menjadi dua yaitu *indirect power control* (IPC) dan *direct power control* (DPC). IPC merupakan terminology yang merujuk pada beberapa metode konvensional yaitu kontrol *tip speed ratio* (TSR), kontrol *optimal torque* (OT) dan *power signal feedback* (PSF). Namun ketiga metode tersebut menunjukkan performansi yang rendah pada kondisi perubahan cuaca yang cepat dan membutuhkan informasi kecepatan angin, torsi generator dan karakteristik turbin untuk menentukan daya maksimum. Kelemahan utama dari ketiga metode tersebut yaitu

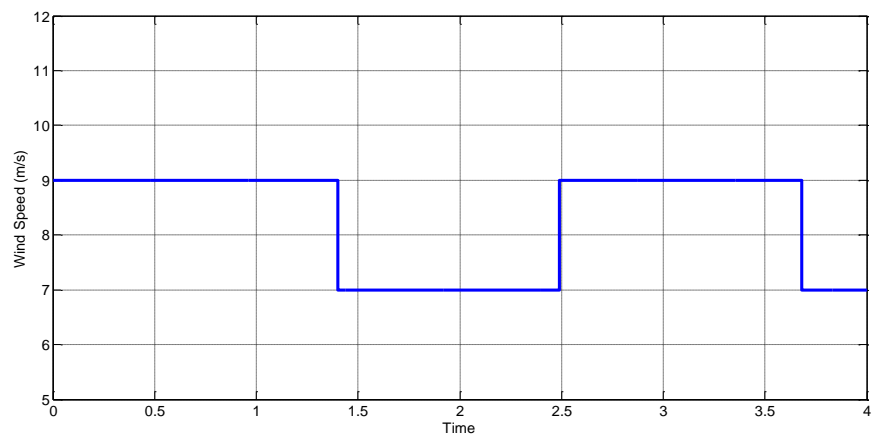
1. Metode TSR membutuhkan anemometer dengan kualitas tinggi sehingga akan meningkatkan biaya peralatan dalam implementasi.
2. Metode OT sangat tergantung pada pengetahuan mengenai karakteristik daya- torsi sehingga membutuhkan sensor untuk pengukuran torsi generator. Pada metode ini, torsi generator diatur untuk mencapai torsi optimum sehingga metode ini membutuhkan informasi mengenai kerapatan udara dan parameter mekanik turbin yang sangat tergantung pada sistem.
3. Metode PSF juga membutuhkan karakteristik daya-kecepatan sehingga sangat tergantung pada sistem yang digunakan [35] [37].

Sedangkan DPC merupakan metode yang tidak membutuhkan sensor kecepatan angin, spesifikasi generator turbin dan karakteristik turbin untuk menentukan daya maksimum sehingga metode dalam kategori ini tidak tergantung pada sistem, sangat handal dan efektif dalam pembiayaan. Metode yang termasuk dalam kategori ini yaitu metode *perturb and observe* (P&O), kontrol logika fuzzy, artificial neural network (ANN), metode *swarm intelligence* seperti metode PSO dan *Firefly*. Kecuali metode ANN dan logika fuzzy, metode DPC umumnya menggunakan tegangan dan arus untuk menghitung daya dan menentukan titik daya maksimum melalui pengaturan *duty cycle*.

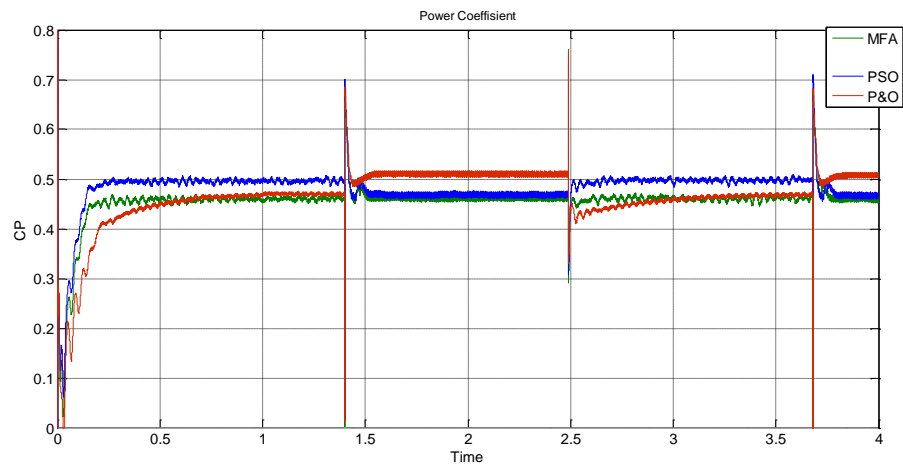
Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, pada penelitian ini telah dilakukan uji beberapa algoritma MPPT pada sistem turbin angin yang terbagi

menjadi dua yaitu sistem turbin angin terhubung grid dan sistem turbin angin *stand alone*. Tiga algoritma MPPT diterapkan pada sistem turbin angin terhubung grid yaitu metode P&O, PSO dan *modified firefly*. Sedangkan pada turbin angin *stand alone* diterapkan dua metode MPPT yaitu *modified P&O*, dan kontrol logika fuzzy. Gambar 4.31 menunjukkan perbandingan ekstraksi daya maksimum dengan menggunakan algoritma P&O, PSO dan *modified firefly*.

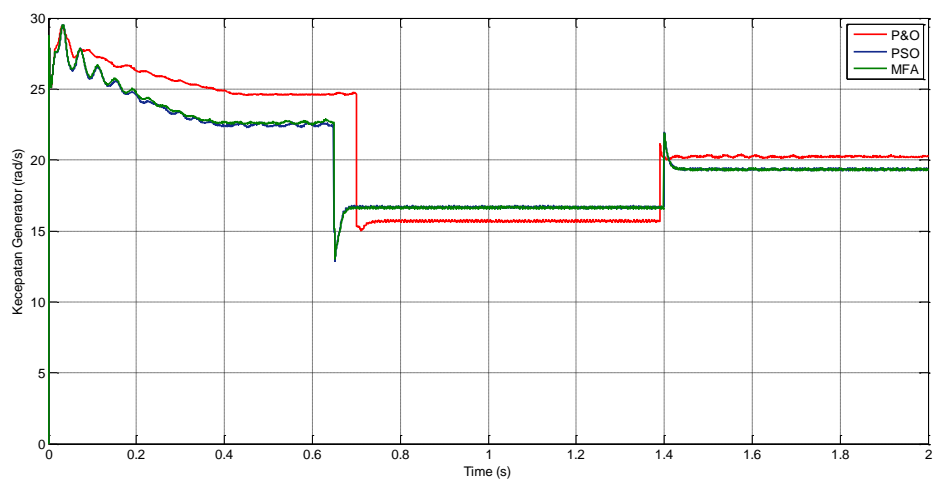
Simulasi dilakukan dengan memberikan perubahan kecepatan angin seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.31a dengan variasi kecepatan 7 m/s hingga 9 m/s. Untuk mendapatkan daya maksimum pada kondisi variasi kecepatan angin, sistem turbin angin harus bekerja pada koefisien konversi daya optimal. Pada interval waktu $0 < t < 1,4$ detik dengan kecepatan angin 9m/s, algoritma *modified firefly* dapat menggerakkan turbin angin untuk mencapai nilai C_p optimum sebesar 0,48, demikian pula dengan metode P&O, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.31b. Namun respon dengan menggunakan *modified firefly* lebih cepat dibandingkan dengan metode P&O. Ketika kecepatan angin diturunkan pada 7m/s, pada interval waktu $1,4 \text{ detik} < t < 2,5 \text{ detik}$, algoritma *modified Firefly* dapat mempertahankan turbin angin bekerja pada C_p optimal, sedangkan untuk algoritma P&O dan PSO terdapat sedikit pergeseran nilai C_p optimal. Dengan menerapkan algoritma MPPT, kecepatan generator dapat mencapai nilai optimal dengan mengikuti perubahan kecepatan angin. Hasil simulasi menunjukkan bahwa algoritma P&O, PSO, dan *modified Firefly* dapat mengatur kecepatan generator untuk bekerja pada kecepatan optimum, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.31c. Namun berdasarkan respon kecepatan generator, *modified Firefly* memiliki respon yang lebih cepat dibandingkan metode yang lain dan algoritma P&O menghasilkan respon yang paling buruk untuk mengikuti perubahan kecepatan angin.



(a) Profil Kecepatan Angin



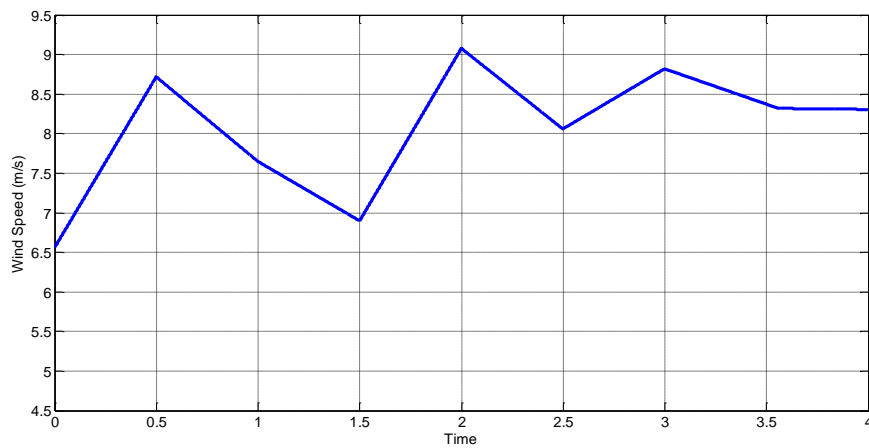
(b) Koefisien Konversi Daya (C_p)



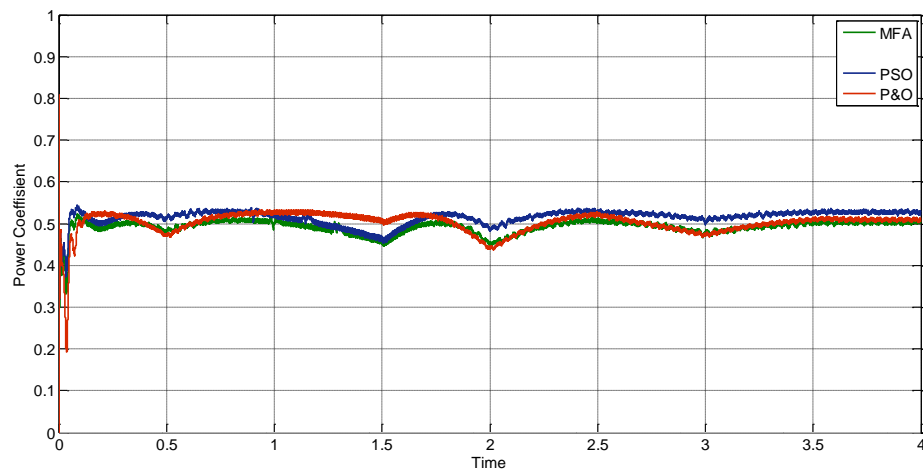
(c) Kecepatan Generator

Gambar 4. 31 Hasil Simulasi Algoritma P&O, PSO dan *Modified Firefly* Sebagai MPPT Pada Turbin Angin Terhubung Grid

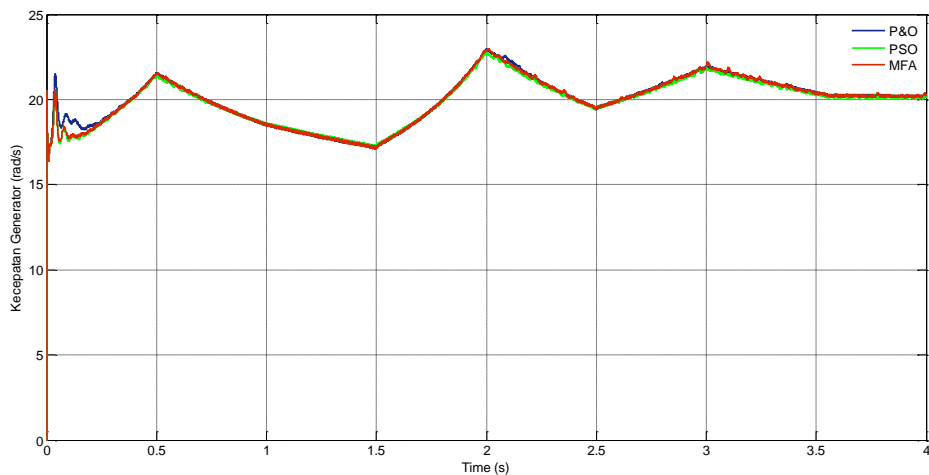
Untuk menguji performansi algoritma MPPT pada kondisi kecepatan angin yang cepat maka simulasi juga dilakukan dengan memberikan perubahan kecepatan angin acak, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.32. Variasi kecepatan angin antara 6,5 m/s hingga 9m/s diterapkan pada sistem turbin angin dengan menggunakan algoritma MPPT, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.32a. Algoritma *modified Firefly* menghasilkan performansi dibawah perubahan kecepatan angin acak lebih baik dibandingkan algoritma PSO dan P&O karena dapat mempertahankan nilai C_p lebih stabil, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.32b. Demikian pula dengan kecepatan generator yang dapat menghasilkan kecepatan optimal mengikuti perubahan kecepatan angin seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.32c.



(a) Profil Kecepatan Angin



(b) Koefisien Konversi Daya



(c) Kecepatan Generator

Gambar 4. 32 Hasil Simulasi Algoritma P&O, PSO dan *Modified Firefly* Pada Turbin Angin Terhubung Grid Pada Perubahan Kecepatan Angin Acak

Algoritma P&O merupakan algoritma yang sederhana yang diterapkan pada turbin angin sebagai MPPT tanpa menggunakan sensor mekanik dan kecepatan angin. Kekurangan dari algoritma P&O adalah munculnya osilasi nya pada daerah di sekitar MPP dan algoritma ini sangat tergantung pada *step size* yang dinyatakan sebagai konstanta. Nilai *step size* yang kecil akan meningkatkan efisiensi pencarian dan mengurangi osilasi disekitar MPP namun akan memperlambat waktu pencarian. Sedangkan nilai *step size* semakin besar akan

mempercepat waktu pencarian namun akan memperbesar osilasi disekitar MPP dan menurunkan efisiensi [35][37][6]. Kekurangan dari algoritma P&O dapat diperbaiki dengan memodifikasi algoritma P&O. Algoritma *modified* P&O yang diterapkan dan disimulasikan pada sistem turbin angin skala kecil memiliki nilai *step size* yang dapat berubah secara adaptif tergantung pada iterasi yang telah dicapai. Algoritma ini juga mengurangi nilai osilasi dengan memberikan nilai daya threshold pada algoritma.

Untuk mengatasi kekurangan pada metode konvensional, telah dikembangkan algoritma artificial intelligent seperti logika fuzzy dan ANN dan swarm intelligent seperti PSO, *Firefly*, cuckoo search dan lainnya. Pada penelitian ini juga dikembangkan algoritma fuzzy, PSO dan *modified Firefly* untuk optimasi pada ekstraksi daya maksimum. Perbandingan antara algoritma P&O, *modified Firefly*, PSO, *modified* P&O dan kontrol logika fuzzy ditunjukkan pada Tabel 4.2. Terdapat beberapa kriteria penting yang digunakan dalam menganalisa perbandingan antara beberapa metode MPPT yaitu kecepatan konvergen, kompleksitas algoritma, performansi terhadap perubahan kecepatan angin, kebutuhan memori dan kebutuhan sensor mekanik.

Tabel 4. 2 Perbandingan Beberapa Metode MPPT Yang Telah Disimulasikan

Metode	Kompleksitas algoritma	Kecepatan konvergen	Performansi thd perubahan angin	Kebutuhan memori	Kebutuhan sensor mekanik
Optimasi daya pada SKEA terhubung ke grid					
P&O	Sederhana	Tergantung	Kurang	Rendah	Tidak
<i>Modified Firefly</i>	Tinggi	Cepat	Tinggi	Tinggi	Tidak
PSO	Tinggi	Cepat	Tinggi	Tinggi	Tidak
Optimasi daya pada SKEA <i>stand alone</i>					
<i>Modified</i> P&O	Medium	Medium	Medium	Rendah	Tidak
Logika	Tinggi	Cepat	Tinggi	Tinggi	Tidak

Fuzzy					
-------	--	--	--	--	--

Dalam implementasi MPPT, parameter yang perlu dianalisis dan memiliki pengaruh langsung pada performansi sistem adalah kompleksitas algoritma. Beberapa faktor yang menentukan kompleksitas yaitu logika kontrol, jumlah langkah, penalaan parameter dan inisialisasi parameter [37]. Berdasarkan kompleksitas algoritma, metode P&O memiliki kompleksitas yang paling sederhana. Dengan memodifikasi algoritma P&O akan meningkatkan kompleksitas karena meningkatkan jumlah step dan logika kontrol. Penggunaan logika fuzzy, *modified Firefly* dan PSO meningkatkan kompleksitas algoritma. Pada logika fuzzy, penyusunan *rule base*, proses fuzzyfikasi dan defuzzyfikasi meningkatkan kompleksitas. PSO dan *modified Firefly* memiliki kompleksitas yang sama.

Secara umum, pemilihan beberapa algoritma dalam implementasi berdasarkan kecepatan konvergen yang merupakan faktor yang tidak dapat dihindari dan harus diperhitungkan sebelum mengimplementasikan MPPT [37]. Kecepatan konvergen pada penggunaan algoritma P&O sangat tergantung pada pemilihan *step size* dimana semakin kecil nilai *step size* akan memperlambat kecepatan konvergen. Berdasarkan hasil simulasi, kecepatan konvergen PSO dan *modified Firefly* lebih cepat dibandingkan dengan P&O. Demikian pula logika fuzzy memiliki kecepatan konvergence yang lebih cepat dibandingkan *modified P&O*. Selain itu kebutuhan memori untuk implementasi MPPT secara langsung tergantung pada jumlah iterasi dan jumlah langkah [37][35]. Algoritma konvensional, P&O dan *modified P&O*, membutuhkan memori yang jauh lebih sedikit dibandingkan algoritma PSO, *modified Firefly* dan logika fuzzy.

Kecepatan angin merupakan sumber yang berubah dengan cepat sehingga akan menaikkan atau menurunkan daya keluaran secara drastis. Hal ini mempengaruhi performansi MPPT dan meningkatkan rugi-rugi daya. Di dalam sistem turbin angin, inersia turbin akan bervariasi secara linier terhadap perubahan kecepatan angin [37]. Oleh karena itu, algoritma MPPT harus selalu mempertahankan kecepatan optimal untuk beroperasi pada daerah MPP. Metode *modified Firefly*, logika fuzzy dan PSO memiliki performansi yang lebih baik

dibandingkan metode P&O dan *modified* P&O untuk kondisi angin yang berubah secara cepat. Dari keseluruhan algoritma MPPT yang telah disimulasikan pada penelitian ini, tidak ada yang membutuhkan sensor kecepatan angin dan mekanik.

-----*Halaman Ini Sengaja Dikosongkan*-----

BAB 5

KONTROL OPTIMUM PADA KONVERSI ENERGI ANGIN MENGUNAKAN SISTEM PENYIMPAN ENERGI

Sistem turbin angin sangat tergantung pada kecepatan angin yang berfluktuasi. Pada kecepatan angin tertentu, turbin angin memiliki titik daya maksimum tertentu. Untuk meningkatkan efisiensi, sistem turbin angin harus beroperasi pada titik daya maksimum yang dapat dikontrol menggunakan kontroler untuk ekstraksi daya maksimum yang telah dibahas pada bab sebelumnya. Oleh karena itu kecepatan angin yang berfluktuasi akan mengakibatkan daya optimal yang dihasilkan juga berfluktuasi. Sehingga untuk mendapatkan daya konstan yang sesuai dengan kebutuhan beban atau grid diperlukan kontroler.

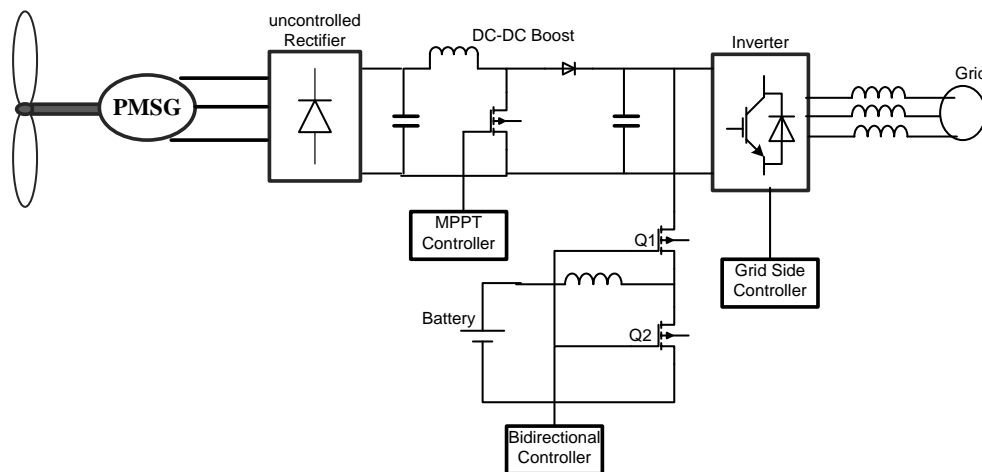
Pada bab ini akan membahas kontrol optimum pada sistem konversi energi angin menggunakan baterai sebagai penyimpan energi pada sistem turbin angin terhubung grid. Kontrol optimum pada sistem turbin angin terhubung ke grid terbagi menjadi dua yaitu kontrol *rotor side converter* (RSC) dan kontrol *grid side converter* (GSC). Kontrol RSC berfungsi untuk mengatur kecepatan generator sehingga sistem turbin angin beroperasi pada daya maksimum dengan menggunakan kontroler MPPT seperti yang telah dijelaskan pada Bab 4. Sedangkan kontrol GSC berfungsi untuk mengatur tegangan DC link dan pengaturan daya aktif dan reaktif yang dikirim ke grid. Kontrol GSC tidak tergantung pada jenis konverter yang terhubung pada generator dan hanya terfokus pada integrasi grid pada sistem turbin angin. Kontrol GSC diklasifikasikan dalam dua grup yaitu *voltage oriented control* (VOC) dan *direct power control* (DPC). Kontrol berdasarkan VOC terdiri dari struktur kontrol dua loop yang terdiri dari loop kontrol tegangan DC link dan loop kontrol arus yang berdasarkan kontrol hysteresis atau kontrol PI dalam *synchronous reference frame*. *Unity power factor* dapat dicapai ketika arus referensi sumbu-q diatur sebesar nol. VOC memiliki performansi *steady state* yang baik, respon yang

cepat dan meningkatkan kualitas daya dengan riak daya minimum. Sedangkan DPC terdiri dari dua variabel kontrol yaitu daya aktif dan reaktif dan tidak memiliki blok PWM atau loop kontrol arus. *Unity power factor* dapat dicapai ketika referensi daya reaktif diatur sebesar nol. Penggunaan metode ini mengurangi kompleksitas sistem, memiliki respon dinamik yang cepat dan mengurangi waktu komputasi. Namun sistem dengan DPC membutuhkan frekuensi pencuplikan dan filter induktansi sehingga meningkatkan biaya dan memperbesar THD dengan riak arus yang tinggi [45]. Mendis [114] menggunakan baterai dan super kapasitor untuk mempertahankan keseimbangan antara daya yang dibutuhkan beban dan daya yang dihasilkan oleh turbin angin. Namun penggunaan super kapasitor meningkatkan biaya peralatan karena biaya super kapasitor yang termasuk mahal. Hussein [79][115] menggunakan penyimpan energi baterai untuk mengatur keseimbangan daya pada sistem *stand alone* dan sistem yang terhubung ke grid. Baterai terhubung dengan tegangan dc link melalui konverter *bidirectional* yang diatur menggunakan kontroler PI. Sedangkan untuk mendapatkan daya yang dibutuhkan oleh grid dilakukan melalui pengaturan arus dan tegangan. Berdasarkan hasil simulasi kontrol ini dapat mempertahankan suplai daya sesuai dengan kebutuhan grid terhadap variasi kecepatan angin.

Mishra [116] menggunakan baterai sebagai penyimpan energi untuk mempertahankan daya konstan ke grid menggunakan metode *bacteria foraging* (BF) pada sistem turbin angin dengan *double fed induction generator* (DFIG). Selama kecepatan angin tinggi, kelebihan energi disimpan pada baterai dan selama kecepatan angin rendah, baterai akan dikirim ke grid sehingga daya grid tetap dalam kondisi konstan. Selain menggunakan sistem penyimpan energi, pengaturan daya konstan pada SKEA juga dapat dilakukan dengan memprediksi daya yang dihasilkan dan mengatur SKEA untuk bekerja pada daya rata-rata berdasarkan hasil prediksi tersebut. Namun penggunaan metode tersebut membutuhkan prediksi angin dan daya yang akurat sehingga meningkatkan kebutuhan memori dan peralatan untuk pengukuran angin [117]. Metode BF digunakan untuk mengoptimasi parameter kontroler PI yang digunakan pada kontrol optimal pada sistem ini. Sedangkan Hadjina [77] mengatur GSC pada

turbin angin dengan PMSG melalui kontrol arus dalam model dq menggunakan kontroler PI. Penalaan parameter kontroler PI menggunakan metode root locus. Pada penelitian ini menggunakan baterai sebagai penyimpan energi untuk mendapatkan daya konstan pada grid.

Gambar 5.1 menunjukkan konfigurasi sistem turbin angin PMSG yang terhubung ke grid dan menggunakan baterai. Sistem terdiri dari turbin angin dengan PMSG, penyearah jembatan dioda tidak terkontrol, konverter boost, konverter *bidirectional*, baterai dan *voltage source inverter* (VSI) dan grid yang terhubung ke sistem melalui filter RL. Baterai terhubung ke tegangan dc link melalui konverter *bidirectional* yang akan mengatur pengisian dan pengosongan baterai untuk memenuhi daya yang dibutuhkan oleh grid.



Gambar 5. 1 Blok Diagram Turbin Angin Dengan PMSG Menggunakan Baterai

Pada sistem turbin angin ini terdiri dari tiga kontroler yaitu kontroler MPPT, kontroler konverter *bidirectional*, dan kontroler GSC. Kontroler MPPT berfungsi untuk mendapatkan daya optimal untuk setiap kecepatan angin menggunakan metode *modified Firefly* yang telah dibahas pada Bab 4. Kontroler konverter *bidirectional* mengatur tegangan dc-link untuk mendapatkan nilai konstan pada nilai tertentu melalui pengaturan pengisian dan pengosongan baterai sebagai penyimpan energi. Sedangkan kontroler GSC akan mengatur *voltage source inverter* (VSI) untuk dapat menghasilkan daya yang dibutuhkan oleh grid. Pengujian dilakukan secara simulasi dengan memberikan perubahan kecepatan angin dan perubahan daya yang dibutuhkan.

5.1 Baterai Sebagai Penyimpan Energi

Baterai merupakan salah satu komponen sistem penyimpanan energi pada sistem turbin angin dan merupakan salah satu komponen penting yang digunakan untuk mempertahankan keseimbangan antara daya yang dihasilkan dari turbin angin dan daya beban yang dibutuhkan melalui pengisian dan pengosongan energi dari dan atau ke sistem penyimpan ini[111]. Sistem penyimpanan energi dapat diklasifikasikan menjadi beberapa grup yaitu *electrical double layer capacitor* (Supercapacitor/ EDLC), *superconducting magnetic energy storage* (SMES), *flywheel energy storage system* (FESS), *flow battery energy storage system* (FBESS) dan *battery energy storage system* (BESS). EDLC memiliki masa pakai yang panjang, tidak membutuhkan perawatan, efisiensi energi tinggi namun memiliki biaya yang sangat mahal, diperkirakan sekitar 5 kali baterai lead acid. Demikian pula dengan SMES memiliki masa pakai yang panjang dapat mencapai puluhan ribu siklus dan daya yang ditangkap dapat ditingkatkan hingga mencapai 200kW hanya dalam 20ms, namun teknologi ini membutuhkan biaya yang sangat mahal. FESS memiliki daya yang lebih besar, jangkauan suhu operasi yang lebar dan kerapatan energi yang lebih besar namun FESS bukan perangkat yang sesuai untuk penyimpanan energi jangka panjang. FBES disebut juga dengan *redox flow batteries*, merupakan teknologi yang relative baru dan terdiri tiga jenis yang tersedia di pasaran yaitu *Vanadium redox battery* (VRB), *zinc bromine battery* (ZBB) dan *polysulphide bromide battery* (PBB). FBES dapat dikosongkan secara penuh tanpa menyebabkan kerusakan sehingga teknologi ini rendah perawatan dan dapat menyimpan energi untuk jangka waktu yang lama namun biaya yang dibutuhkan masih cukup tinggi [118 - 119].

Baterai merupakan salah satu teknologi penyimpanan energi yang tertua dan paling banyak digunakan karena biaya yang cukup efektif untuk aplikasi daya kecil maupun tinggi. Baterai terdiri dari dua atau lebih sel yang dihubungkan dengan susunan secara seri atau parallel untuk mendapatkan kapasitas dan tegangan operasi tertentu yang dibutuhkan. Baterai memiliki efisiensi pengisian dan pengosongan yang tinggi, masa pakai yang panjang dan biaya yang relatif rendah [9]. Sehingga pada penelitian ini menggunakan baterai sebagai penyimpan

energi untuk turbin angin skala kecil dimana faktor biaya merupakan salah satu hal yang penting. Beberapa jenis baterai yang tersedia di pasaran yaitu [120]

- Baterai Nickel-Cadmium, baterai yang banyak dikenal, dimana electrode positif merupakan susunan *nickel hydroxide* dan electrode negative merupakan susunan *metallic cadmium* dan *cadmium hydroxide*. Baterai jenis ini memiliki karakteristik yang baik dan tidak membutuhkan perawatan yang rumit namun biaya masih lebih mahal sekitar 10 kali dari baterai lead acid sehingga jarang digunakan pada sistem turbin angin [118] [120].
- Baterai lead acid, memiliki performansi yang relative rendah pada suhu ambien tinggi dan rendah dan masa pakai yang singkat. Baterai jenis ini yang paling banyak digunakan pada aplikasi photovoltaic terutama pada sistem *stand alone* karena mudah dibawa.
- Baterai sodium sulfur, merupakan salah satu baterai yang paling sesuai untuk aplikasi penyimpanan energi daya tinggi dengan kerapatan energi dan efisiensi energi yang sangat tinggi. Jenis baterai ini sering digunakan pada sistem turbin angin.
- Baterai lithium ion digunakan secara luas pada aplikasi kecil. Kelebihan utama dari jenis ini yaitu kemampuan pengisian dan pengosongan yang cepat dan masa pakai yang panjang. Sehingga jenis ini sangat sesuai untuk aplikasi dimana respon waktu dan berat merupakan hal yang penting. Baterai lithium ion paling banyak digunakan pada sistem turbin angin [118] [120] .

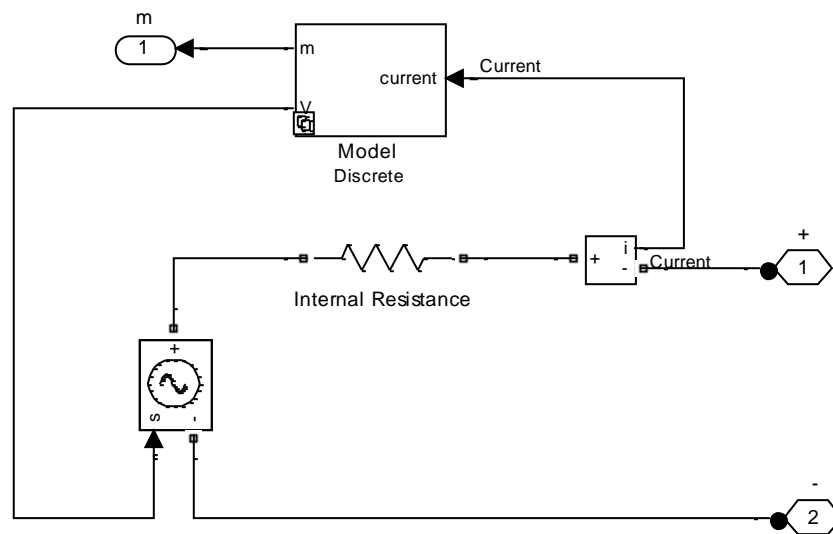
Pada penelitian ini menggunakan baterai lead acid sebagai penyimpan energi untuk sistem turbin angin. Beberapa penelitian juga telah menggunakan baterai jenis ini untuk sistem turbin angin yang terhubung ke grid dan *stand alone* dan dapat bekerja dengan baik [40][79][115]. Kapasitas baterai yang digunakan dapat ditentukan dengan persamaan [114-115]

$$\text{Kap Bat} = \frac{P_{\text{rated}} \cdot t}{V_{\text{rated}} \cdot DOD} \quad (5.1)$$

Dimana P_{rated} merupakan daya yang harus disediakan baterai, t merupakan waktu yang dibutuhkan baterai untuk menyediakan daya ke sistem, V_{rated} merupakan

tegangan baterai dan DOD merupakan *depth of discharge* dari baterai yang merupakan nilai yang menunjukkan besarnya arus listrik yang telah digunakan oleh baterai dan dihitung dalam persen. Tegangan baterai sebesar 150 V ketika tegangan DC link referensi sebesar 400V. Dengan asumsi jika pada saat daya angin sebesar nol dan baterai harus dapat mensuplai daya ke beban sebesar 6KW dengan waktu selama satu jam dan DOD sebesar 80% maka kapasitas baterai yang dibutuhkan dapat ditentukan sebesar

$$\text{Kap Bat} = \frac{6\text{KW} \cdot 1}{150 \cdot 0.8} = 50\text{AH}$$



Gambar 5. 2 Model Baterai Pada Simulink

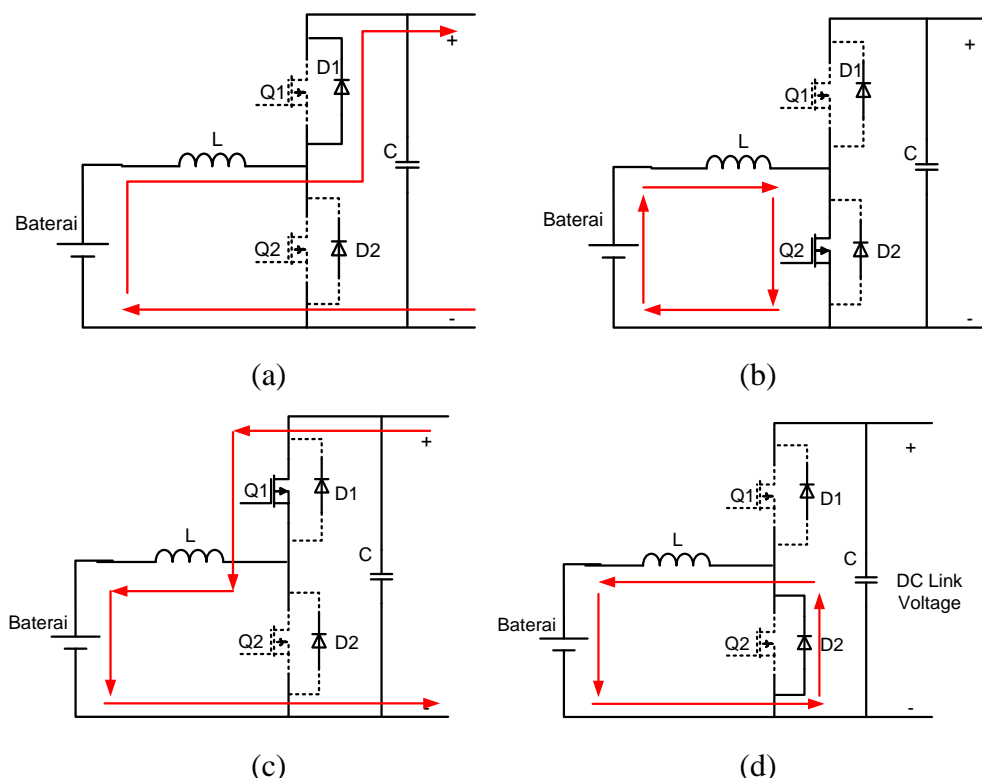
Pemodelan baterai dilakukan dengan menggunakan Simulink Matlab yang menunjukkan model baterai lead acid berdasarkan sumber tegangan variabel yang terhubung seri dengan resistansi internal, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.2. Model ini menghitung tegangan sesaat baterai (V_{bat}) sebagai fungsi dari beberapa parameter dan kondisi operasi aktual peralatan dapat dinyatakan dengan

$$V_{bat} = E_{bat} - R_i \cdot i_{bat} \quad (5.2)$$

Dimana E_{bat} merupakan tegangan tanpa beban, R_i merupakan tahanan internal baterai dan i_{bat} merupakan arus sesaat baterai. Tegangan tanpa beban berbeda antara proses pengisian dan pengosongan baterai dan tergantung pada arus baterai, kapasitas, kapasitas yang digunakan dan histerisis dari siklus pengisian dan pengosongan baterai.

5.2 Kontroler Konverter Bidirectional

Baterai sebagai penyimpan energi dihubungkan ke tegangan DC-link melalui konverter buck boost *bidirectional*, yang terdiri dari dua komponen switching IGBT yang bekerja secara bergantian. Hussein dkk [79] menggunakan konverter bidirectional pada sistem turbin angin *stand alone* dengan kontroler *propotional integral* untuk mengatur *duty cycle* pada konverter. Berdasarkan hasil simulasi, konverter ini dapat mempertahankan tegangan DC link konstan melalui proses pengisian dan pengosongan baterai sehingga didapatkan tegangan keluaran konstan ke beban walaupun terjadi variasi kecepatan angin. Demikian pula Suresh [121] mendesain konverter bidirectional untuk sistem energi angin dan berdasarkan hasil simulasi dan eksperimen konverter ini dapat bekerja dengan baik untuk menyimpan energi ke baterai sehingga arus dan tegangan beban stabil. Beberapa penelitian juga menggunakan konverter bidirectional pada sistem turbin angin [114][122 - 124].



Gambar 5. 3 Prinsip Kerja Konverter *Bidirectional*

Pada penelitian ini menggunakan konverter buck boost *bidirectional* untuk mempertahankan tegangan DC link dengan menggunakan kontroler PI. Gambar 5.3 menunjukkan prinsip kerja rangkaian konverter *bidirectional* yang dapat terbagi menjadi empat interval yaitu [79] [121]

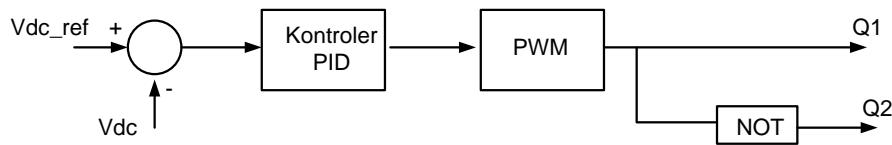
- Interval 1 (Q2 ON, D2 Off, Q1 off, D1 Off) : Dalam interval ini Q2 akan konduksi dan D2 akan dibias mundur sedangkan Q1 dan D1 akan off, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.3a. Selama interval ini konverter beroperasi dalam mode boost dan induktor akan diisi sehingga arus induktor akan meningkat. Karena D1 dibias mundur dan Q1 tidak konduksi maka tidak ada arus yang mengalir melalui Q1.
- Interval 2 (D1 ON, Q2 Off, Q1 off, D2 Off) : Dalam interval ini Q2 dan Q1 akan dimatikan dan D2 akan dibias mundur sedangkan D1 akan konduksi, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.3b. Sehingga pada konverter akan menyuplai daya ke DC link.
- Interval 3 (Q1 ON, Q2 Off, D1 off, D2 Off) : Dalam interval ini Q1 akan aktif dan D1 akan dibias mundur sedangkan Q2 akan dimatikan dan D2 akan dibias mundur, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.3c. Selama interval ini konverter beroperasi dalam mode buck dan daya dari DC link dikirim ke baterai.
- Interval 4 (D2 ON, Q2 Off, Q1 off, D1 Off) : Dalam interval ini Q2 dan Q1 akan dimatikan dan D1 akan dibias mundur sedangkan D2 akan konduksi, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.3d. Pada interval ini karena arus induktor tidak dapat berubah langsung maka akan dibuang melalui dioda D2 sehingga tegangan pada DC link akan turun dibandingkan tegangan baterai.

Kontrol pada konverter *bidirectional* bertujuan untuk mempertahankan tegangan DC link pada nilai konstan terhadap perubahan kecepatan angin dan kecepatan generator. Selain itu, kontrol ini juga akan mempertahankan keseimbangan daya antara daya yang dihasilkan oleh turbin angin dan daya yang dibutuhkan oleh grid. Kontroler pada konverter *bidirectional* menggunakan kontroler *propotional integrator differentiator* (PID) berdasarkan tegangan DC link, tegangan DC link referensi dan error, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.4. Error merupakan selisih antara tegangan DC link referensi dan hasil

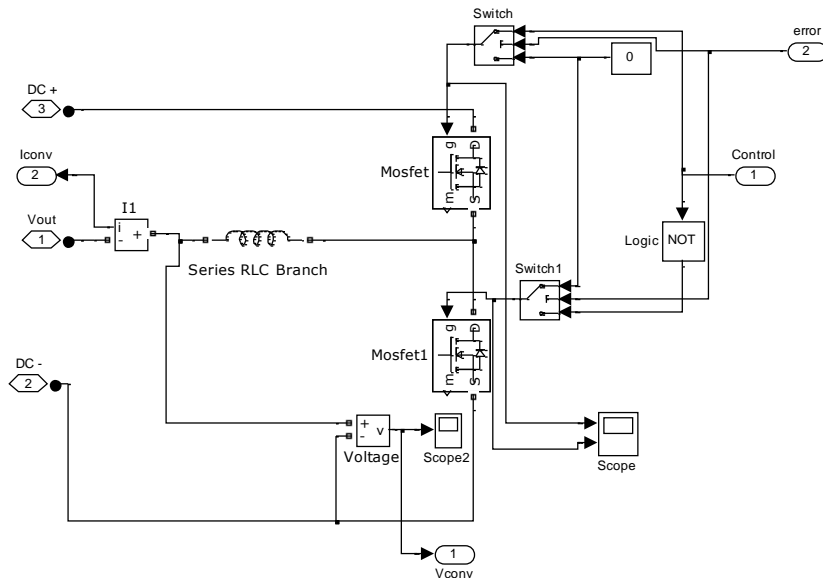
pengukuran tegangan DC link. Jika tegangan DC lebih besar dari tegangan referensi maka baterai akan diisi dan sebaliknya jika tegangan DC lebih rendah dari tegangan referensi maka baterai akan menyuplai ke DC link untuk mempertahankan tegangan DC link sesuai dengan referensi yang digunakan. Gambar 5.4a menunjukkan kontroler PID yang digunakan untuk konverter *bidirectional*. Kontroler PID yang digunakan dapat ditentukan dengan persamaan

$$U(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (5.3)$$

Dimana $U(t)$ merupakan sinyal kontrol, K_p merupakan penguatan proposional, K_i merupakan penguatan integrator, K_d merupakan penguatan differensiator dan $e(t)$ merupakan error. Keluaran dari kontroler PID akan melalui pembangkit *pulse width modulation* (PWM) untuk menghasilkan *duty cycle*. Nilai parameter kontroler PID yang digunakan pada penelitian ini yaitu $K_p = 400$, $K_i = 10$ dan $K_d = 0,4$ [125].



(a) Kontroler PID untuk Konverter *Bidirectional*

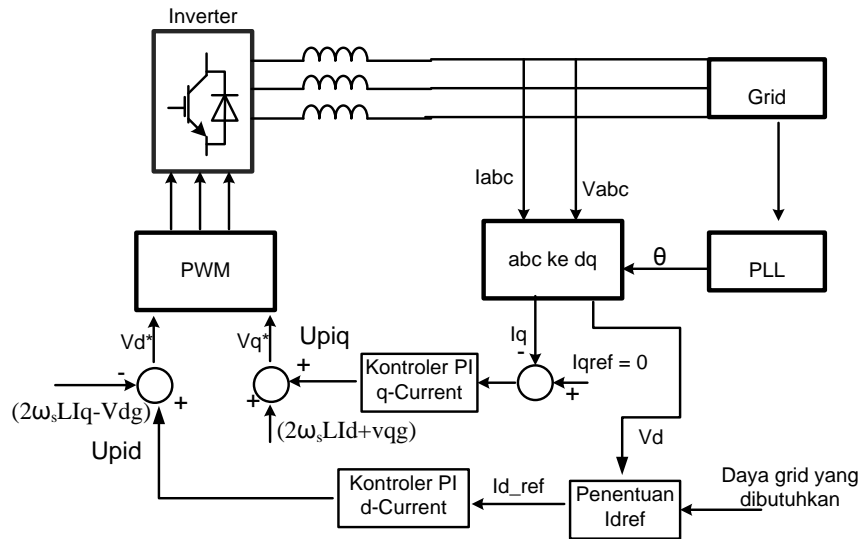


(b) Pemodelan Konverter *Bidirectional* Dengan Simulink Matlab

Gambar 5. 4 Kontroler dan Model Konverter *Bidirectional*

5.3 Kontrol Grid Side Converter

Grid side converter (GSC) menghubungkan tegangan DC link dan grid dan akan mengkonversi tegangan DC menjadi tegangan AC. GSC terdiri dari inverter dan filter pasif “RL” yang menghubungkan antara inverter dan grid untuk mengurangi *noise* dan menghaluskan sinyal AC pada grid. Kontrol GSC dilakukan melalui pengontrolan arus sumbu d dan q dan berdasarkan daya yang dibutuhkan oleh grid[126]. Kontroler yang digunakan pada pengontrolan arus adalah kontroler PI. Gambar 5.5 menunjukkan kontrol GSC yang terdiri dari dua kontroler PI untuk arus sumbu d dan sumbu q, pembangkit PWM dan *phase locked loop* (PLL).



Gambar 5. 5 Kontrol *Grid Side Converter*

Berdasarkan pemodelan GSC yang telah dibahas pada bab 3, pengontrolan daya aktif dapat dilakukan melalui pengontrolan arus inverter sumbu d sedangkan daya reaktif dapat diatur melalui pengontrolan arus sumbu q, seperti yang dinyatakan pada persamaan (3.46) dan (3.47)

$$P = \frac{3}{2} V_{dg} I_d$$

$$Q = \frac{3}{2} V_{dg} I_q$$

Pengontrolan arus sumbu d dan q dilakukan dengan menggunakan kontroler PI dimana arus sumbu d referensi (i_{dref}) ditentukan berdasarkan daya grid yang dibutuhkan (P_{ref}) dan persamaan (3.46), sehingga didapatkan

$$i_{dref} = \frac{P_{ref}}{1.5v_{dg}} \quad (5.4)$$

Sedangkan arus referensi sumbu q (i_{qref}) ditentukan sebesar nol untuk mendapatkan *unity power factor* [2]. Keluaran sistem kontrol untuk pengontrolan arus sumbu d (U_{pid}) dan sumbu q (U_{piq}), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.5, dapat dipresentasikan dengan persamaan [126]

$$v_d = U_{pid} - 2\omega_s L i_q + v_{dg} \quad (5.5)$$

$$v_q = U_{piq} + 2\omega_s L i_d + v_{qg} \quad (5.6)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (5.5) dan (5.6) ke dalam persamaan differensial arus i_d dan i_q pada persamaan (3.44) dan (3.45) maka akan didapatkan

$$\frac{di_d}{dt} = -\frac{R}{L} i_d + \frac{1}{L} U_{pid} \quad (5.7)$$

$$\frac{di_q}{dt} = -\frac{R}{L} i_q + \frac{1}{L} U_{piq} \quad (5.8)$$

Berdasarkan persamaan di atas dapat ditentukan persamaan fungsi alih perubahan keluaran kontrol PI dan arus sumbu d dan q dalam fungsi laplace dinyatakan dengan,

$$H(s) = \frac{I_d(s)}{U_{pid}(s)} = \frac{I_q(s)}{U_{piq}(s)} = \frac{1/R}{\left(\frac{L}{R}\right)s + 1} \quad (5.9)$$

Sistem kontrol PI dalam transformasi Laplace dinyatakan dengan

$$U_{pi}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) [I^*(s) - I(s)] \quad (5.10)$$

Dimana K_p merupakan penguatan proposional, T_i merupakan penguatan integrator, dan I^* merupakan arus referensi dalam transformasi laplace. Dengan mensubstitusikan persamaan (5.10) pada (5.9) dan dengan melakukan penyederhaan, fungsi alih loop tertutup sistem kontrol arus sumbu d dan q dapat dinyatakan dengan

$$H(s) = \frac{I(s)}{I^*(s)} = \frac{\left(\frac{1}{R}\right)K_p(s + \frac{1}{T_i})}{s\left(\left(\frac{L}{R}\right)s + 1\right) + \left(\frac{1}{R}\right)K_p(s + \frac{1}{T_i})} \quad (5.11)$$

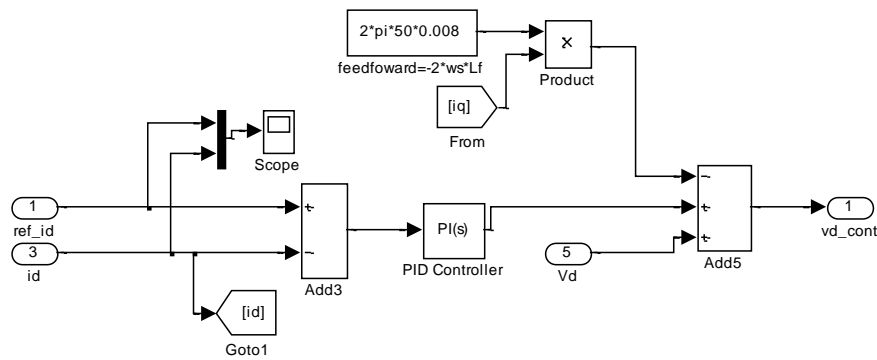
Dengan menggunakan metode penempatan pole, penguat proposional dan integrator dapat ditentukan dengan persamaan

$$K_p = \frac{L}{T_{cl}} \quad (5.12)$$

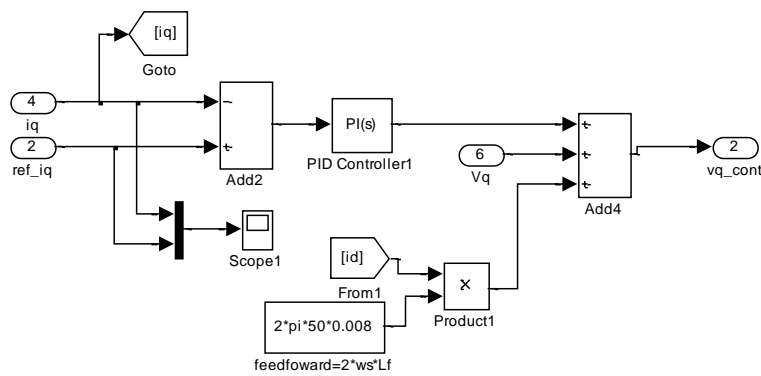
$$T_i = \frac{L}{R} \quad (5.13)$$

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} \quad (5.14)$$

Dengan menggunakan nilai resistansi filter (R) sebesar 0.2Ω dan induktansi sebesar 8mH maka dengan menggunakan persamaan (5.12) hingga (5.14) dapat ditentukan nilai $K_p = 80$ dan $K_i = 2000$. Gambar 5.6 menunjukkan diagram blok sistem kontrol arus dalam model GSC, yang terdiri dari dua kontroler PI. Seperti yang telah dinyatakan dalam persamaan (5.9) maka nilai parameter untuk kedua kontroler adalah sama.



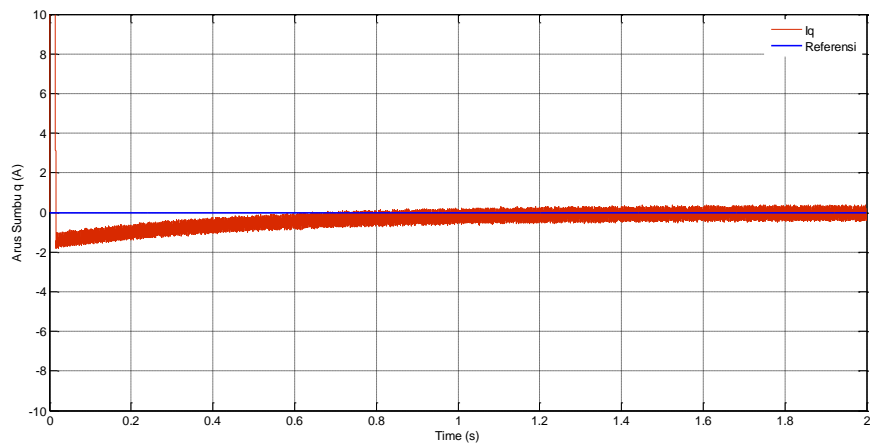
(a) Kontroler Arus Sumbu d



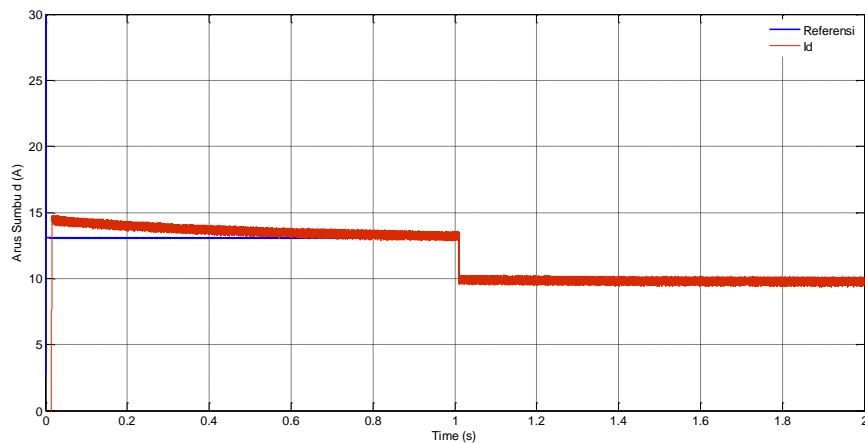
(b) Kontroler Arus Sumbu q

Gambar 5. 6 Kontroler Arus Sumbu d dan q

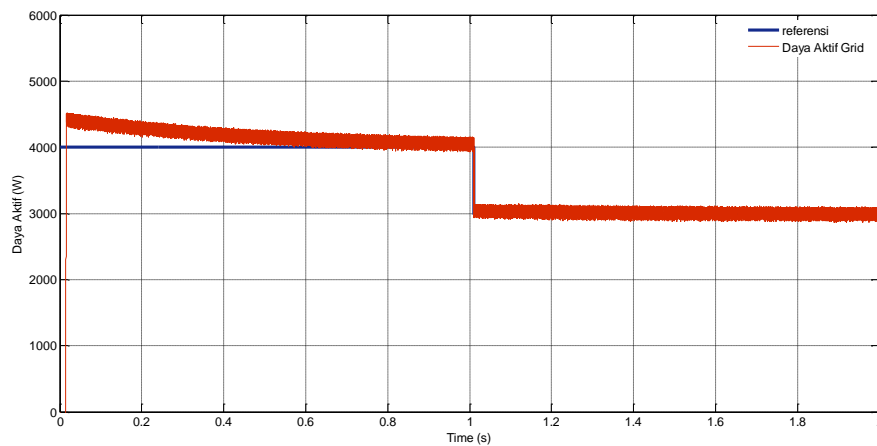
Gambar 5.7 menunjukkan hasil simulasi kontroler arus sumbu d dan q terhadap perubahan kebutuhan daya grid. Arus sumbu q dikontrol untuk selalu sebesar 0 sedangkan arus sumbu d dikontrol untuk dapat mengikuti perubahan arus referensi sumbu d yang nilainya tergantung pada daya yang dibutuhkan grid. Simulasi dilakukan dengan memberikan perubahan pada daya referensi dari 4000W menjadi 3000W. Berdasarkan hasil simulasi kontroler arus sumbu q dapat mengatur nilai i_q sebesar 0 walaupun terjadi perubahan daya aktif. Sedangkan kontroler arus sumbu d dapat mengatur i_d sesuai dengan arus sumbu d referensi, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.7b. Pengaturan arus sumbu d dan q menghasilkan pengaturan daya aktif pada grid yang dapat mengikuti perubahan daya referensi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.7c.



(a) Arus Sumbu q



(b) Arus Id



(c) Perubahan Daya Aktif

Gambar 5. 7 Tanggapan Keluaran Arus Sumbu d dan q Terhadap Perubahan Referensi

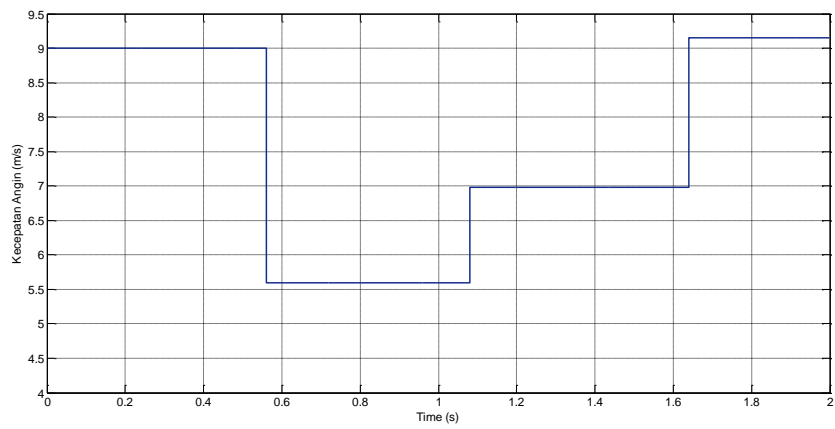
5.4 Hasil Simulasi Kontrol Optimum Pada Sistem Turbin Angin Terhubung Ke Grid

Pengujian kontrol optimum dengan menggunakan baterai sebagai penyimpan energi dilakukan dengan menggunakan Simulink Matlab. Kontroler MPPT menggunakan *modified Firefly* yang telah dibahas pada Bab 4 sedangkan kontroler untuk konverter *bidirectional* dan GSC menggunakan kontroler PI. Pengujian dilakukan dengan memberikan perubahan kecepatan angin berubah. Untuk menganalisa kemampuan kontrol optimal untuk mempertahankan daya konstan sesuai dengan daya yang dibutuhkan maka pengujian dilakukan dengan memberikan kebutuhan daya konstan dan perubahan kebutuhan daya.

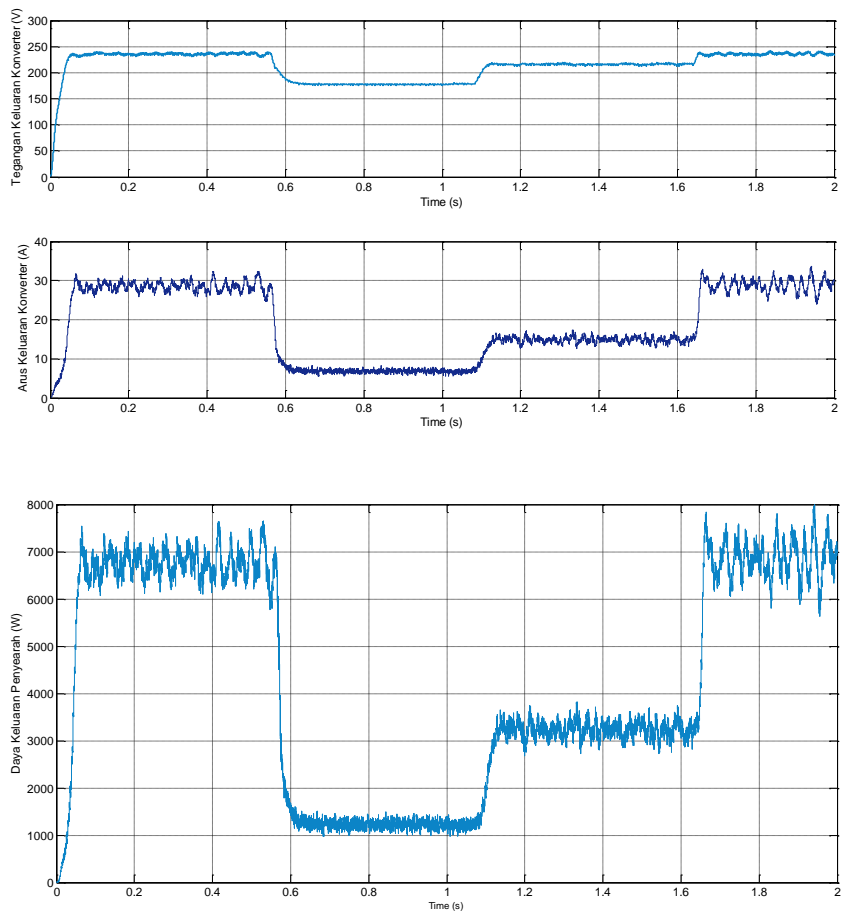
Kasus 1 : Kecepatan Angin Berubah dan Kebutuhan Daya Konstan

Pengujian kontrol optimal pada SKEA dilakukan dengan memberikan perubahan kecepatan angin, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.8 dan daya aktif yang dikirim ke grid dipertahankan konstan. Variasi kecepatan angin dalam bentuk pulsa sebesar 9m/s, 5.6m/s, 7m/s dan meningkat hingga 9,25m/s. SKEA harus dapat mempertahankan daya konstan ke grid walaupun kecepatan angin bervariasi. Kontroler MPPT akan mengatur konverter dc-dc menggunakan *modified Firefly* sehingga SKEA dapat mengekstrak daya optimal pada setiap kecepatan angin tertentu. Gambar 5.9 menunjukkan tegangan, arus dan daya keluaran konverter terhadap perubahan kecepatan angin. Semakin besar kecepatan angin maka daya yang dihasilkan akan semakin besar. Perubahan

kecepatan angin akan mengakibatkan daya keluaran konverteer yang dihasilkan berfluktuasi.

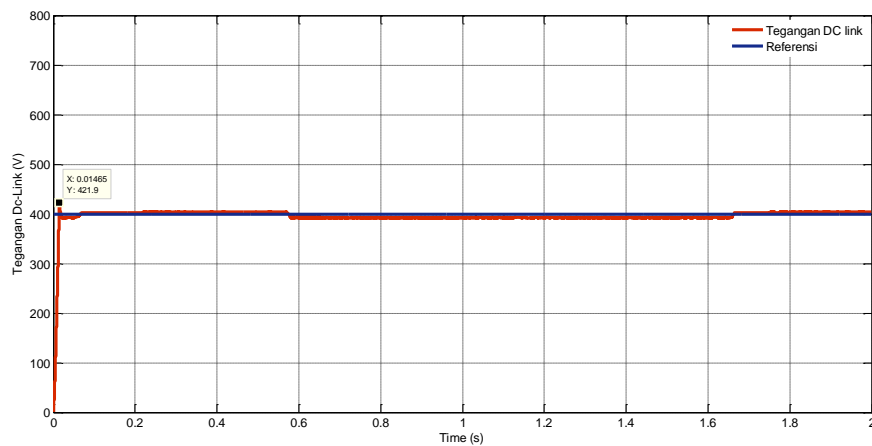


Gambar 5.8 Hasil Simulasi Variasi Kecepatan Angin

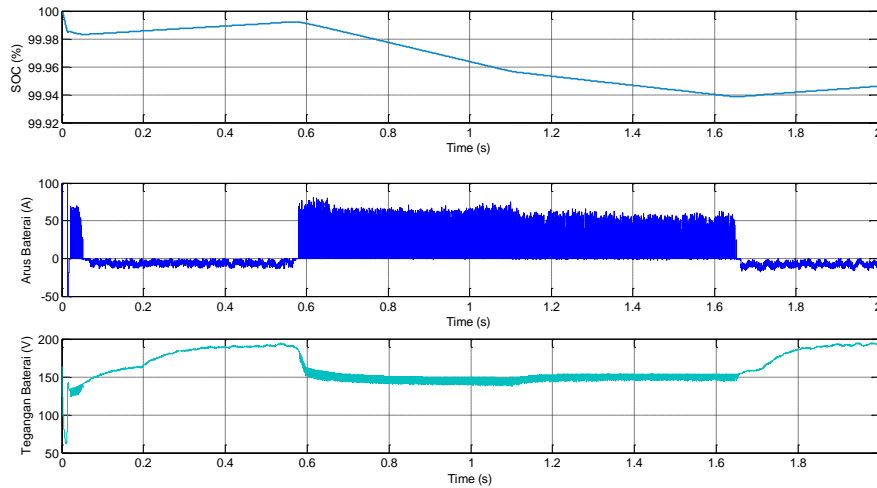


Gambar 5.9 Hasil Simulasi Tegangan, Arus dan Daya Keluaran Konverter Pada Kecepatan Angin Berubah

Untuk mendapatkan daya konstan yang sesuai dengan kebutuhan pada grid, pada penelitian ini menggunakan baterai sebagai penyimpan energi, dimana pengisian dan pengosongan baterai dikontrol melalui konverter *bidirectional* menggunakan kontroler PI. Kontroler untuk konverter *bidirectional* akan mempertahankan tegangan DC link pada nilai sebesar 400V walaupun terjadi variasi kecepatan angin. Kontroler konverter *bidirectional* telah bekerja dengan baik untuk mempertahankan tegangan DC link[125]. Hal ini ditunjukkan oleh respon tegangan DC link, seperti pada Gambar 5.10, dimana tegangan DC link dapat dipertahankan konstan walaupun menghasilkan *overshoot* sebesar 5%. Gambar 5.11 menunjukkan kondisi baterai, dimana pada saat kondisi kecepatan angin 9m/s, baterai akan charge sehingga *state of charge* (SOC) meningkat, demikian pula tegangan pada baterai. Sedangkan pada saat kecepatan angin 5,6m/s dan 7m/s daya yang dihasilkan SKEA rendah demikian pula tegangan nya sehingga untuk mendapatkan tegangan 400V maka baterai akan *discharge*. Hal ini menyebabkan SOC dan tegangan baterai menurun dan arus baterai memiliki polaritas yang berkebalikan[125].

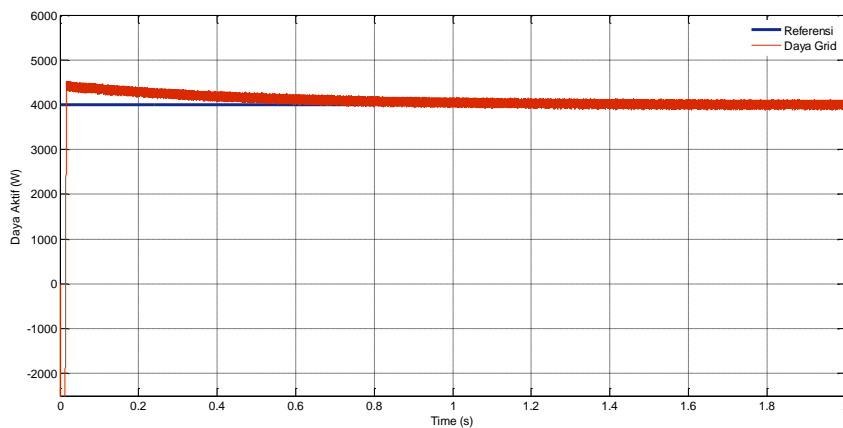


Gambar 5. 10 Hasil Simulasi Tegangan DC Link Pada Kecepatan Angin Berubah

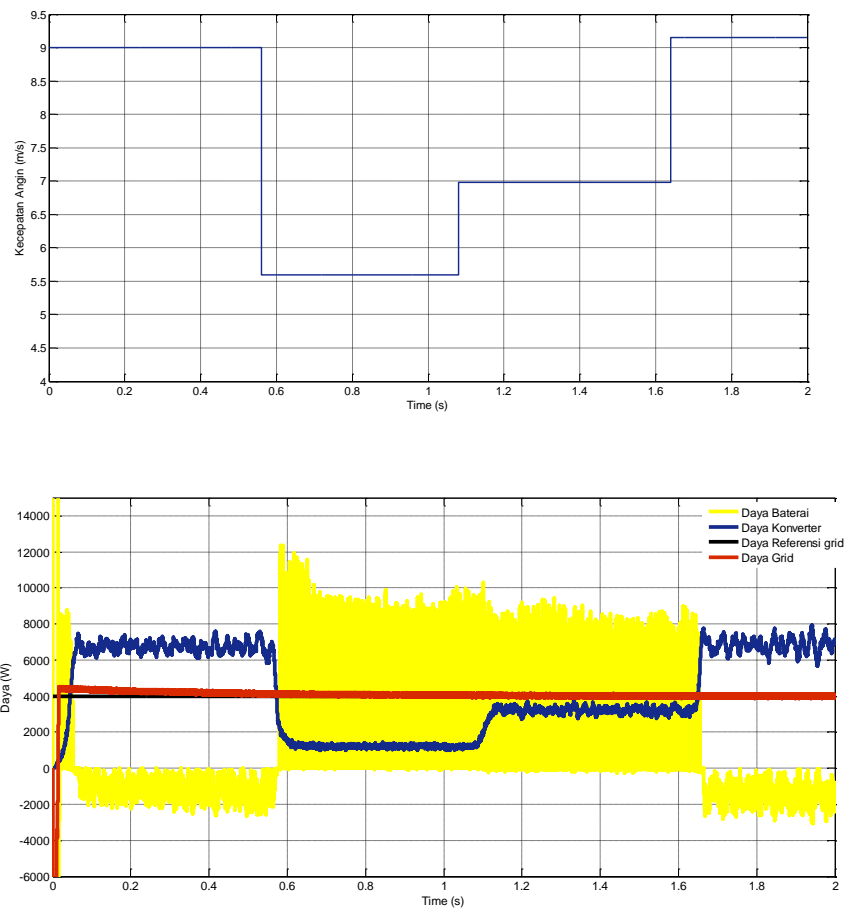


Gambar 5. 11 Hasil Simulasi SOC, Tegangan dan Arus Baterai Pada Kecepatan Angin Berubah

Daya aktif yang dikirim ke grid dipertahankan konstan melalui pengaturan pada GSC menggunakan kontroler PI. Tegangan DC link telah dipertahankan konstan sebesar 400V oleh kontroler konverter *bidirectional* sehingga daya aktif akan diatur sesuai dengan kebutuhan melalui pengaturan arus untuk menentukan duty cycle PWM pada VSI. Gambar 5.12 menunjukkan respon daya aktif yang dikirim ke grid, dimana daya aktif dapat dipertahankan konstan sebesar 4000W walaupun kecepatan angin dan daya yang dihasilkan SKEA berfluktuasi.



Gambar 5. 12 Hasil Simulasi Respon Daya Aktif Pada Kecepatan Angin Berubah



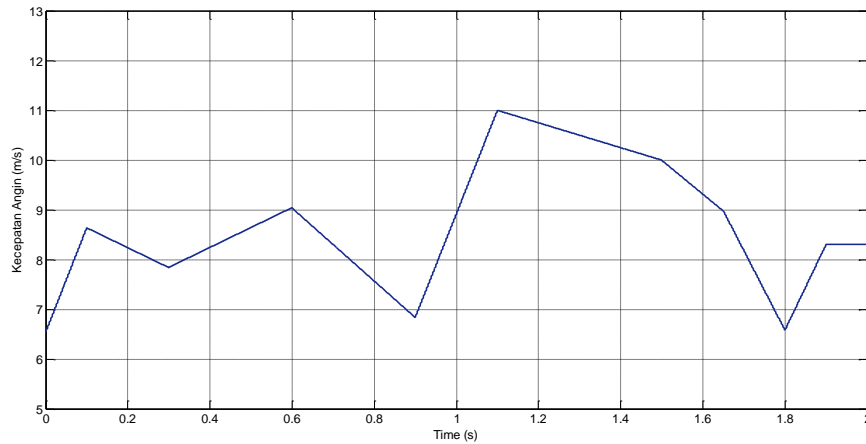
Gambar 5. 13 Hasil Simulasi Daya Baterai, Konverter dan Grid Pada Kecepatan Angin Berubah

Sedangkan Gambar 5.13 menunjukkan daya baterai, daya yang dihasilkan SKEA dan daya aktif pada grid. Pada saat daya yang dihasilkan SKEA diatas 4000W maka baterai akan kontroler konverter *bidirectional* akan mengatur baterai untuk diisi sedangkan jika daya yang dihasilkan SKEA lebih rendah dari 4000W maka baterai akan mengosongkan muatan untuk menyuplai kekurangan daya. Polaritas daya baterai pada saat pengisian dan pengosongan akan berkebalikan karena arus pada baterai juga kan memiliki polaritas yang berbeda.

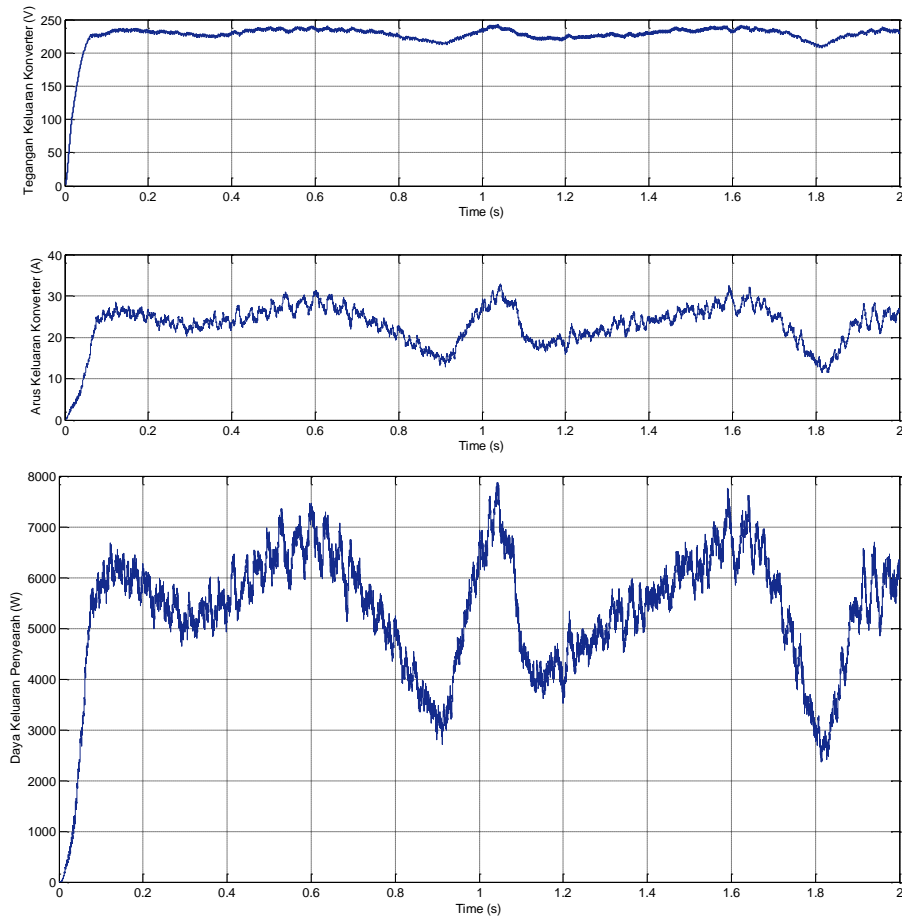
Kasus 2 : Kecepatan Angin Berubah Acak dan Kebutuhan Daya Konstan

Pengujian kontrol optimal pada SKEA dengan menggunakan baterai sebagai penyimpan energi untuk mendapatkan daya konstan dilakukan dengan memberikan perubahan kecepatan angin secara acak, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.14. Perubahan kecepatan angin dilakukan secara acak dengan

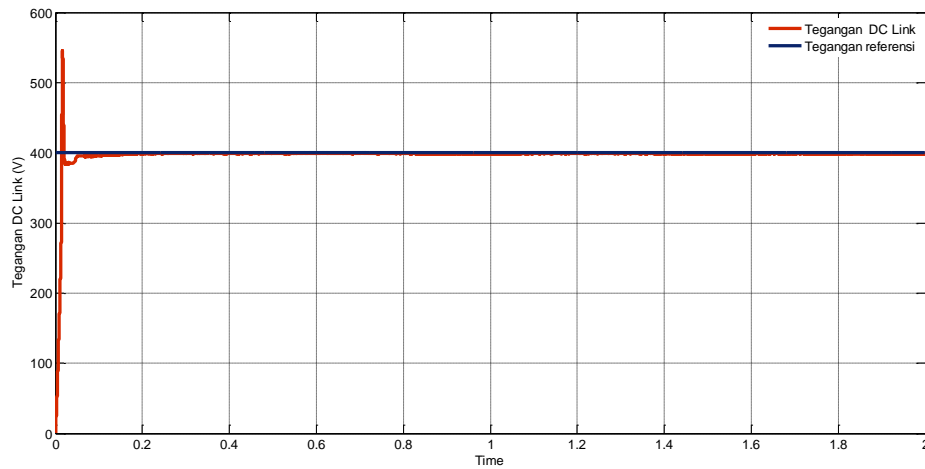
variasi antara 6,5m/s hingga 11m/s. Gambar 5.15 menunjukkan tegangan, arus dan daya penyearah yang dihasilkan dengan menggunakan kontroler MPPT. SKEA bekerja dengan daya optimal untuk setiap perubahan kecepatan angin. Hal ini ditunjukkan respon daya keluaran penyearah yang mengikuti perubahan kecepatan angin.



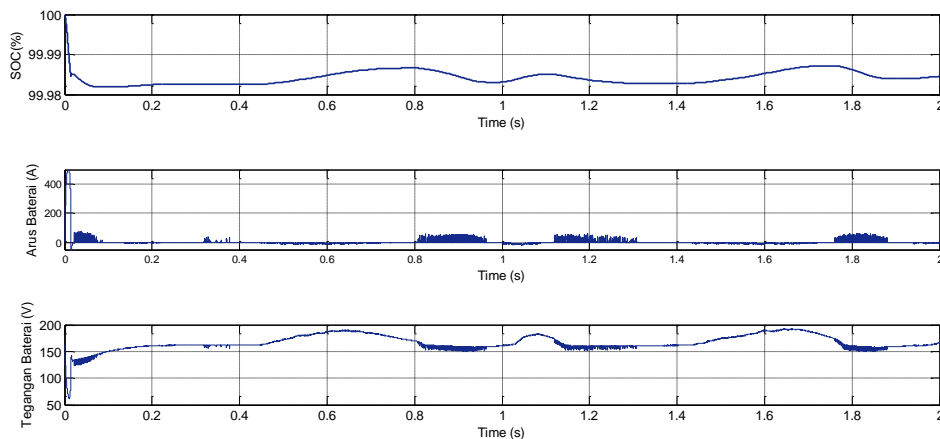
Gambar 5. 14 Hasil Simulasi Profil Kecepatan Angin Acak



Gambar 5. 15 Hasil Simulasi Daya Keluaran Penyearah Pada Kecepatan Angin Acak



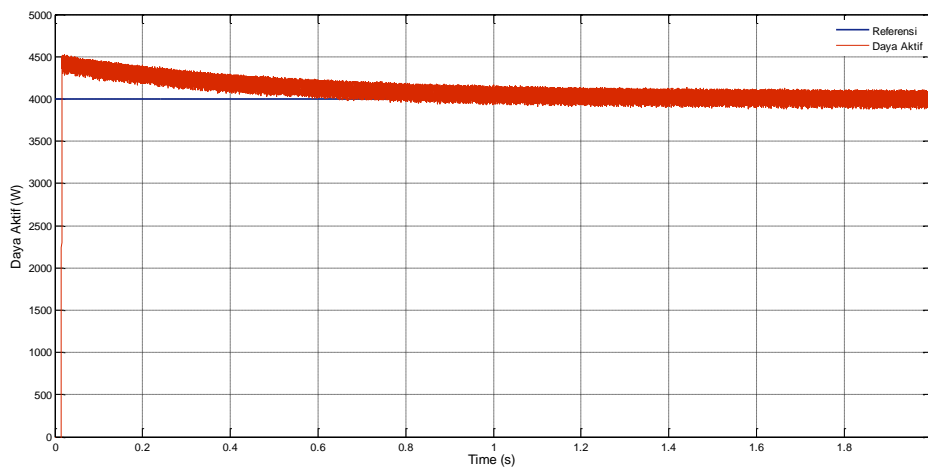
Gambar 5. 16 Hasil Simulasi Respon Tegangan DC Link Pada Kecepatan Angin Acak



Gambar 5. 17 Hasil Simulasi SOC, Arus, dan Tegangan Baterai Pada Kecepatan Angin Acak

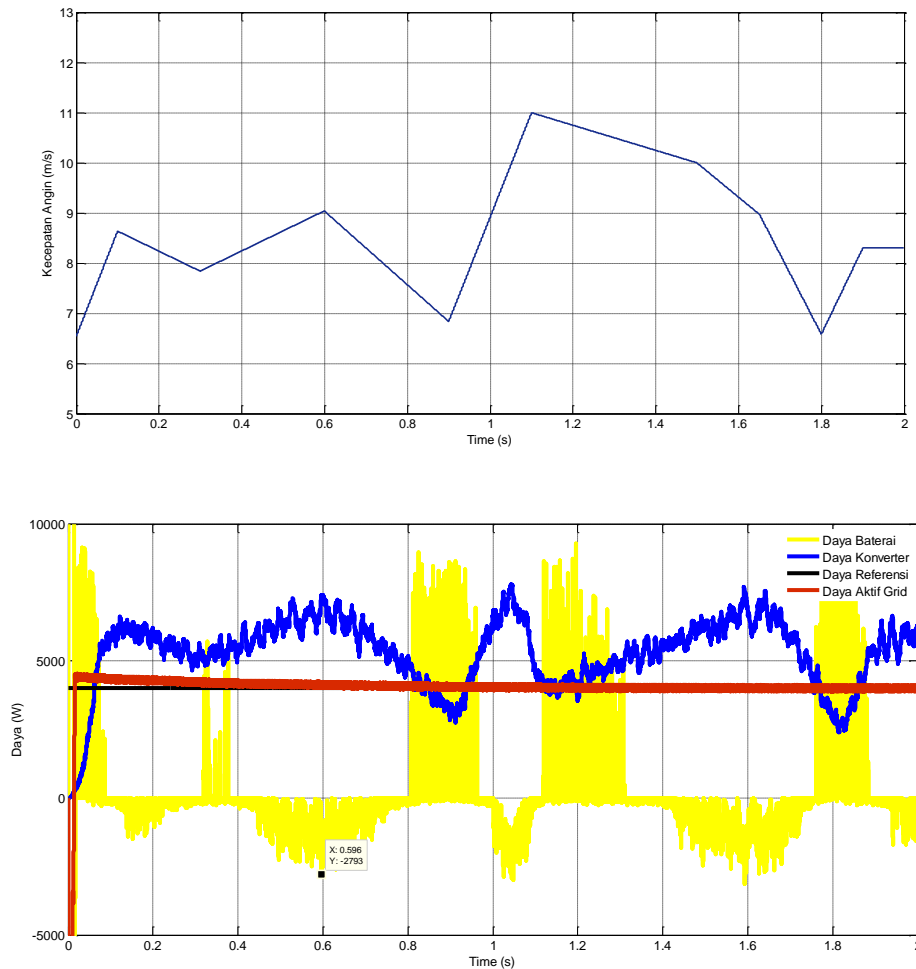
Daya grid akan dipertahankan konstan sebesar 4000W melalui pengaturan konverter *bidirectional* dan GSC. Pengaturan konverter *bidirectional* bertujuan untuk mempertahankan tegangan dc link konstan sebesar 400V melalui pengosongan dan pengisian baterai. Respon tegangan DC link ditunjukkan pada Gambar 5.16. Pengaturan konverter *bidirectional* dengan menggunakan kontroler PI dapat bekerja dengan baik untuk mempertahankan tegangan DC link

sebesar 400V, walaupun menghasilkan overshoot sebesar 25%. Kontroler berfungsi dengan mengatur pengisian dan pengosongan baterai, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.17. Pada kondisi awal, baterai dalam kondisi *full charge* sehingga memiliki *state of the charge* sebesar 100%. Namun daya yang dihasilkan SKEA lebih rendah dibanding daya yang dibutuhkan oleh grid sehingga baterai akan *discharge* dan SOC akan berkurang, demikian pula dengan tegangan baterai akan berkurang. Pada detik 0,6, disaat kecepatan angin mencapai 9m/s, daya yang dihasilkan SKEA lebih besar dibandingkan daya yang dibutuhkan grid sehingga baterai akan *charge* dan tegangan baterai akan meningkat.



Gambar 5. 18 Hasil Simulasi Respon Daya Aktif Pada Kecepatan Angin Acak

Daya grid dipertahankan konstan sebesar 4000W walaupun kecepatan angin dan daya SKEA yang dihasilkan berfluktuasi. Oleh karena itu dibutuhkan kontroler GSC yang akan bekerja untuk mempertahankan daya grid sesuai dengan kebutuhan. Kontroler GSC menggunakan kontroler PI dan dapat bekerja dengan optimal untuk menghasilkan daya konstan pada grid, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.18. Gambar 5.19 menunjukkan daya baterai, grid dan daya yang dihasilkan oleh SKEA. Untuk mempertahankan daya grid konstan, baterai akan menyuplai daya jika daya yang dihasilkan SKEA lebih rendah dari yang dibutuhkan oleh grid atau menyimpan daya jika terjadi kelebihan daya yang dihasilkan SKEA.

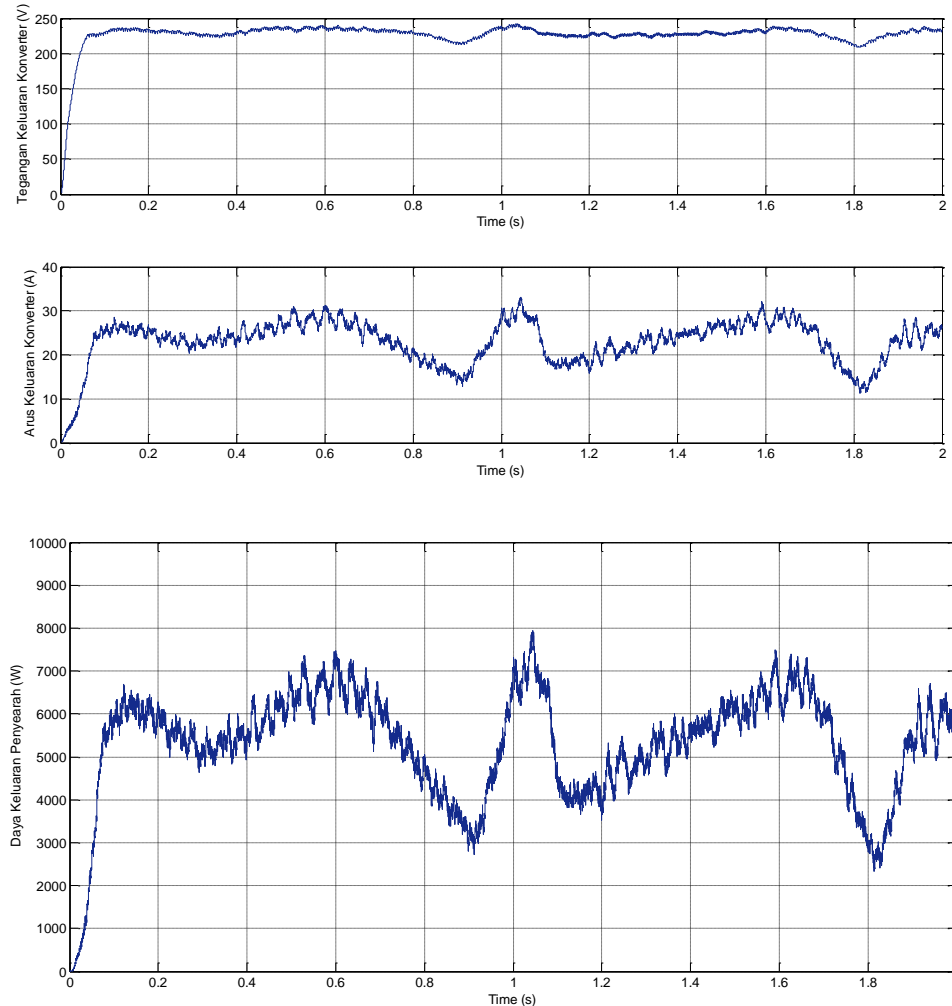


Gambar 5. 19 Hasil Simulasi Daya Baterai, Konverter dan Grid Pada Kecepatan Angin Acak

Kasus 3 : Kecepatan Angin Berubah dan Kebutuhan Daya Berubah

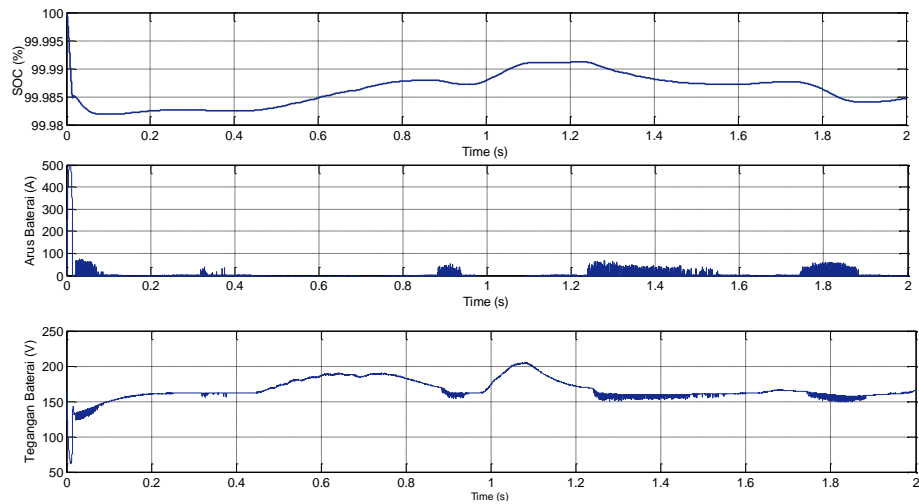
Untuk menguji keandalan kontrol optimal yang telah didesain terhadap perubahan kecepatan angin dan mempertahankan daya aktif sesuai dengan kebutuhan maka dilakukan pengujian dengan memberikan perubahan kecepatan angin secara acak seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.14 dan daya yang dikirim grid berubah sesuai dengan kebutuhan. Gambar 5.20 menunjukkan tegangan, arus dan daya keluaran konverter yang dapat dihasilkan nilai optimal melalui pengaturan daya optimal. Semakin tinggi kecepatan angin maka daya keluaran yang dihasilkan akan semakin besar. Pada pengujian ini daya aktif yang

dikirim ke grid diatur sebesar 4000W yang kemudian diturunkan menjadi 3000W pada saat 0,7s dan akan dinaikkan kembali sebesar 5000W untuk dipertahankan konstan hingga 1,7s yang kemudian akan turun sebesar 4000W.

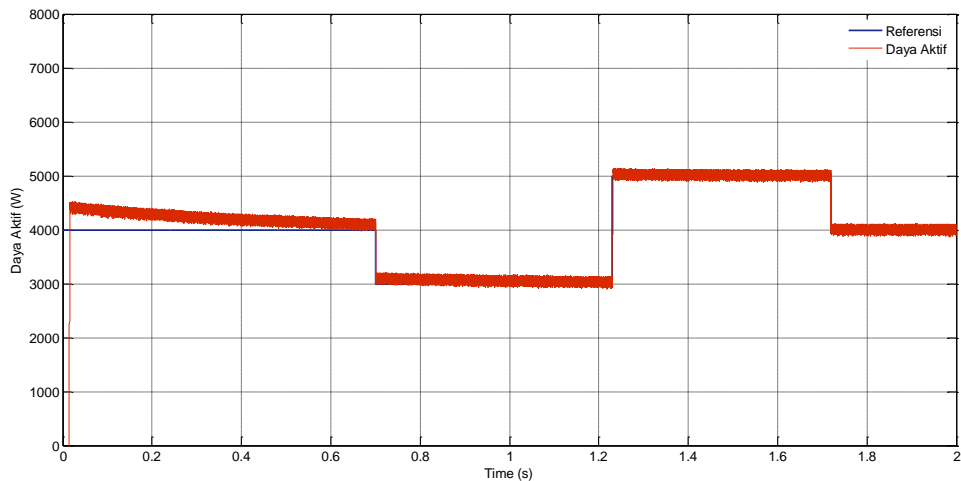


Gambar 5. 20 Hasil Simulasi Tegangan, Arus dan Daya Keluaran Penyearah Pada Kondisi Daya Aktif Berubah

Gambar 5.21 menunjukkan SOC, arus dan tegangan baterai, Pada kondisi awal, baterai dalam kondisi full charge sehingga memiliki *state of the charge* sebesar 100%. Namun daya yang dihasilkan SKEA lebih rendah dibanding daya yang dibutuhkan oleh grid sehingga baterai akan *discharge* dan SOC akan berkurang, demikian pula dengan tegangan baterai akan berkurang. Pada saat kecepatan angin semakin besar dan terjadi kelebihan energi maka baterai akan *charge* dan tegangan baterai meningkat, demikian pula sebaliknya.



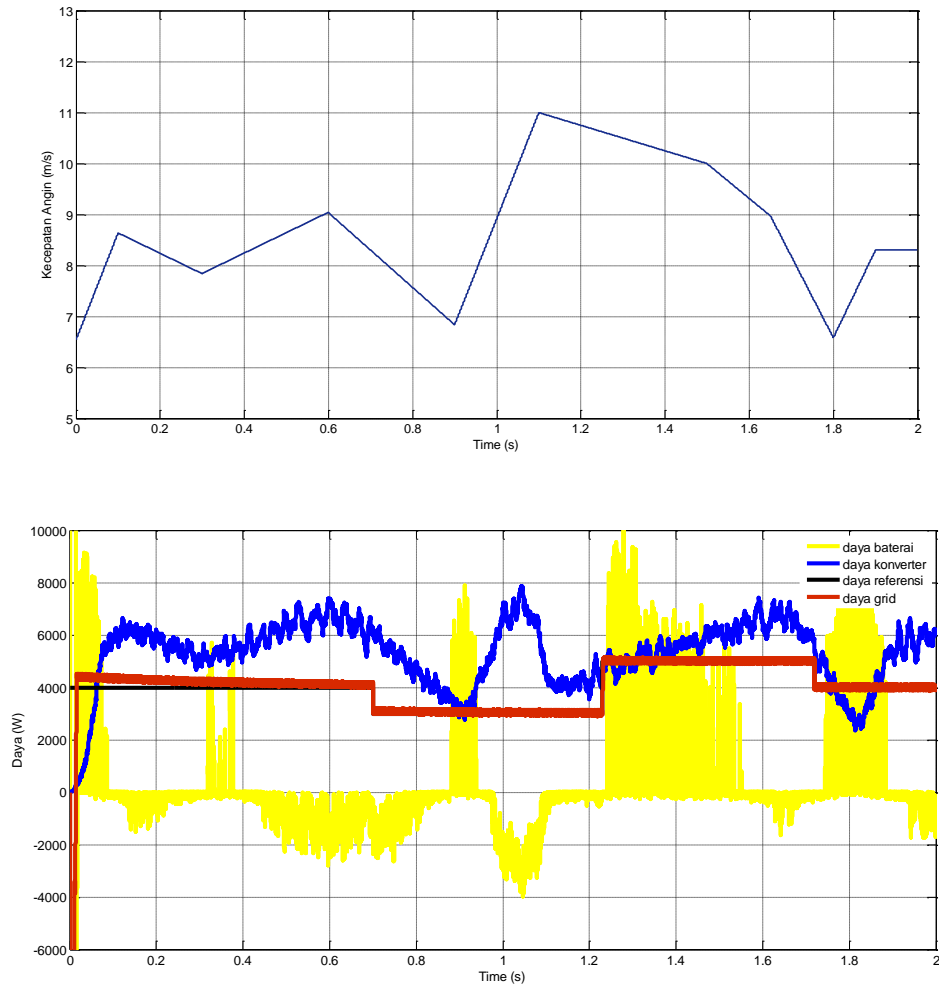
Gambar 5. 21 Hasil Simulasi SOC, Arus dan Tegangan Baterai Pada Kondisi Daya Aktif Berubah



Gambar 5. 22 Hasil Simulasi Respon Daya Aktif Pada Kondisi Daya Aktif Berubah

Pada pengujian ini, daya grid diberikan perubahan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.22, dan kontroler GSC akan mempertahankan daya grid sesuai dengan daya yang dibutuhkan walaupun kecepatan angin dan daya SKEA yang dihasilkan berfluktuasi. Gambar 5.23 menunjukkan daya baterai, grid dan daya yang dihasilkan oleh SKEA. Untuk mempertahankan daya grid konstan, baterai akan menyuplai daya jika daya yang dihasilkan SKEA lebih rendah dari yang dibutuhkan oleh grid atau menyimpan daya jika terjadi kelebihan daya yang dihasilkan SKEA. Berdasarkan respon daya aktif yang dihasilkan kontrol optimal

dapat bekerja dengan baik dan mampu mempertahankan daya konstan yang dikirim ke grid walaupun terjadi perubahan kecepatan angin. Selain itu kontroler dapat mengikuti perubahan daya yang dibutuhkan.



Gambar 5. 23 Hasil Simulasi Daya Baterai, Konverter dan Grid Pada Kondisi Daya Aktif Berubah

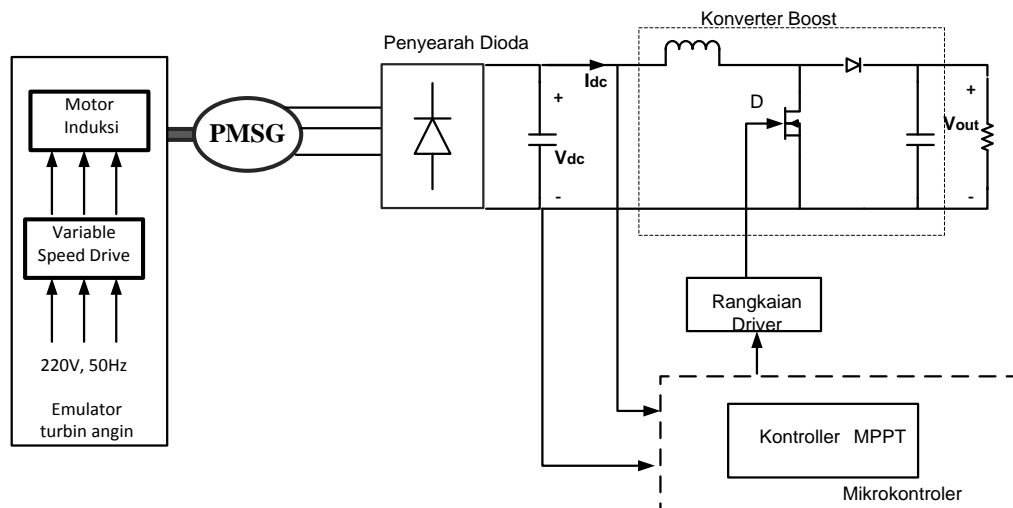
-----*Halaman ini Sengaja Dikosongkan*-----

BAB 6

IMPLEMENTASI MPPT PADA SISTEM KONVERSI ANGIN SKALA KECIL

6.1 Konversi Energi Angin Stand Alone Berbasis Mikrokontroler

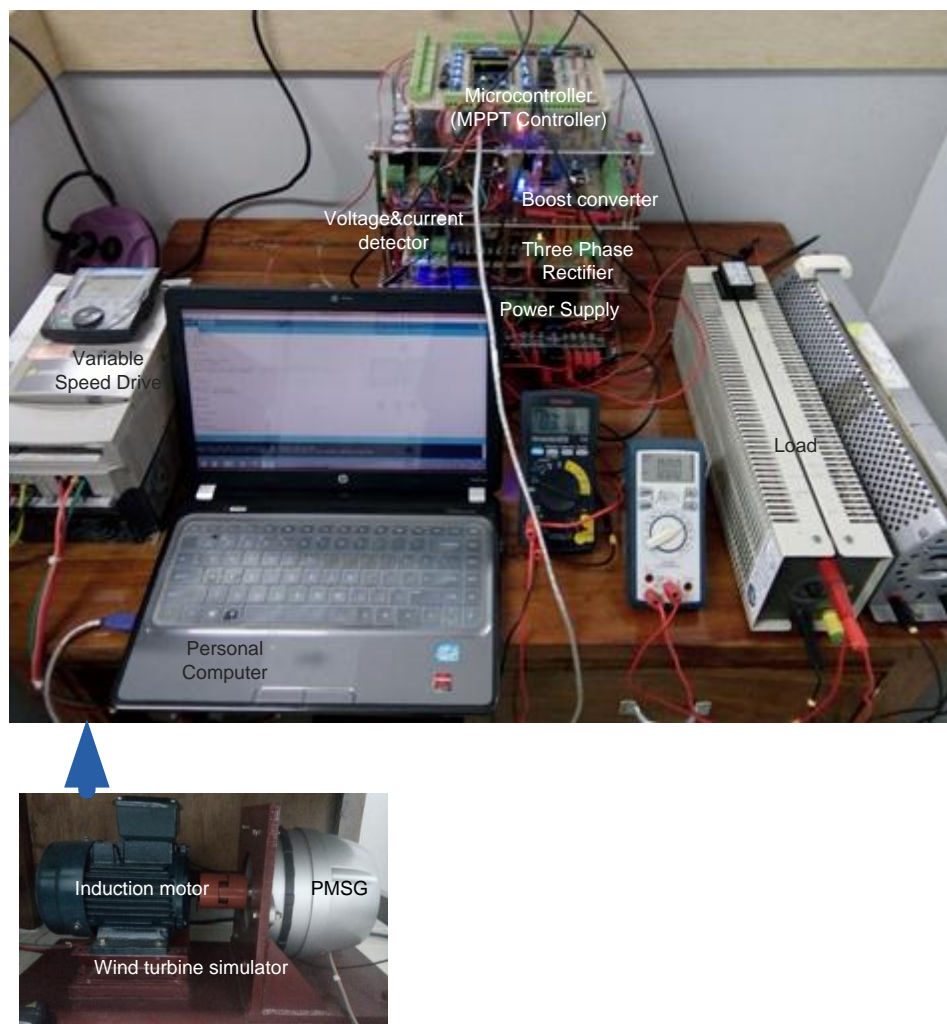
Algoritma MPPT yang telah didapatkan melalui simulasi akan diimplementasikan pada sistem konversi energi angin skala kecil *stand alone*, dengan blok diagram seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.1. Sistem konversi energi angin secara garis besar terdiri dari dua bagian yaitu emulator turbin angin dan turbin angin yang dilengkapi dengan konverter daya. Emulator turbin angin berfungsi untuk mensimulasi perilaku dinamik dari turbin angin terhadap perubahan kecepatan angin. Emulator turbin angin terdiri dari motor induksi dan *variable speed drive* (VSD). Bagian sistem konversi energi angin yang lain yaitu turbin angin yang dilengkapi dengan konverter daya, yang terdiri dari PMSG, penyearah tiga fasa, konverter boost, detektor arus dan tegangan, beban resistif dan mikrokontroler sebagai pusat pengolah data dan mengeksekusi algoritma MPPT.



Gambar 6. 1 Blok Diagram Peralatan Konversi Energi Angin Skala Kecil

Motor induksi dihubungkan secara langsung dengan PMSG tanpa gearbox. Daya yang dihasilkan oleh PMSG akan melalui penyearah dioda 3 fasa yang akan

menghasilkan sinyal DC. Tegangan dan arus keluaran yang dihasilkan rangkaian penyearah akan dideteksi oleh sensor arus dan tegangan. Konverter boost akan menaikkan tegangan DC yang dihasilkan oleh penyearah untuk dihubungkan dengan beban resistif. Pengaturan *duty cycle* untuk switching pada konverter boost dilakukan oleh sistem mikrokontroler berdasarkan algoritma MPPT yang digunakan. Rangkaian *driver* atau penggerak berfungsi sebagai penghubung antara mikrokontroler dengan IGBT sebagai komponen *switching* pada konverter boost, Gambar 6.2 menunjukkan foto peralatan eksperimen sistem konversi energi angin skala kecil.



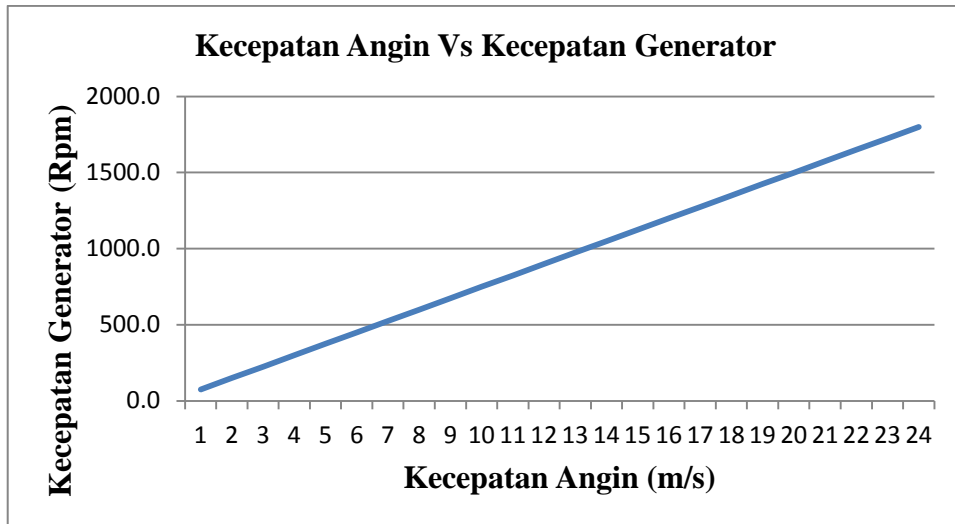
Gambar 6. 2 Peralatan Eksperimen Turbin Angin

6.2 Emulator Turbin Angin

Emulator turbin angin berfungsi untuk mensimulasi perilaku turbin angin terhadap perubahan kecepatan angin. Chen [13] menggunakan AC drive inverter dan permanent magnet synchronous motor (PMSM) sebagai emulator turbin angin untuk memfasilitasi eksperimen di laboratorium. Emulator turbin angin merupakan peralatan yang sangat penting untuk mensimulasikan turbin angin dalam perangkat keras. Sedangkan Hui [76] menggunakan motor induksi dan driver motor untuk mensimulasikan turbin angin dalam eksperimen skala laboratorium. Pada penelitian ini menggunakan motor induksi tiga fasa yang digerakkan oleh *variable speed drives* (VSD) yang akan mengatur torsi motor untuk menggerakkan generator. Spesifikasi motor induksi yang digunakan ditunjukkan pada tabel 6.1. Hubungan antara generator dan kecepatan angin didapatkan melalui pengukuran, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.3. Hubungan antara kecepatan angin dan kecepatan generator berbanding lurus, dimana semakin besar kecepatan angin akan menghasilkan kecepatan angin yang semakin besar pula.

Tabel 6.1 Spesifikasi Motor Induksi A-Y3-905

Parameter	Nilai
Tegangan	220/380 V
Daya Output	1,5 KW
RPM	2850 rpm
Frekwensi	50 Hz
Cos θ	0,84



Gambar 6. 3 Hubungan Kecepatan Generator dan Kecepatan Angin

Gambar 6.4 menunjukkan peralatan turbin angin yang terdiri dari VSD dan motor induksi serta PMSG yang telah terhubung dengan motor induksi. Berdasarkan hubungan antara kecepatan generator dan kecepatan angin, pada kecepatan angin tertentu, motor induksi diatur melalui VSD untuk menggerakkan generator. Kecepatan motor induksi diatur hingga didapatkan kecepatan generator yang sesuai dengan kecepatan angin yang diinginkan. Pada kecepatan angin 6m/s, kecepatan generator harus berputar sebesar 480rpm pada kondisi tanpa beban. Pada penelitian ini menggunakan VSD dengan tipe telemechanique 4kW/5Hp, 380/400V.



Gambar 6. 4 Emulator Turbin Angin

6.3 Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)

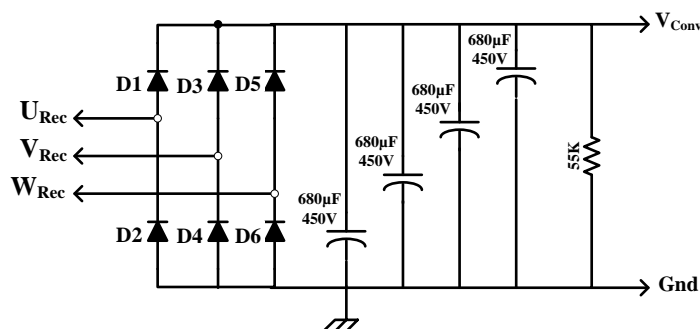
PMSG berfungsi untuk mengkonversi putaran generator menjadi energi listrik tiga fasa. PMSG yang digunakan pada penelitian ini yaitu TD 500 Neidec dengan spesifikasi seperti yang ditunjukkan pada Tabel 6.2.

Tabel 6. 2 Spesifikasi PMSG TD 500 Neidec

Parameter	Nilai
Tegangan	160 V
Daya Output	500 W
RPM	1000 rpm
Tegangan/100 rpm	16 V

6.4 Penyearah Dioda Gelombang Penuh Tiga fasa

Penyearah gelombang penuh tiga fasa berfungsi untuk menyearahkan tegangan AC tiga fasa menjadi tegangan DC. Pada penelitian ini menggunakan penyearah dioda sehingga tegangan keluaran tidak dapat dikendalikan dan tergantung pada tegangan masukan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.5. Penyearah dioda tidak terkendali gelombang penuh tiga fasa menerima tegangan keluaran tiga fasa dari PMSG dan mengkonversi menjadi tegangan DC. Penyearah gelombang penuh tiga fasa terdiri dari tiga lengan dimana masing-masing lengan terdiri dari dua dioda yang aktif secara bergantian. Masing-masing dioda akan konduksi selama 120° . Dioda akan konduksi berpasangan dengan urutan berdasarkan nilai tegangan tertinggi.



Gambar 6. 5 Rangkaian Penyearah Dioda 3 Fasa

Tegangan keluaran rata – rata (V_{DC}) yang dihasilkan oleh penyearah tiga fasa dapat dinyatakan dengan

$$V_{dc} = \frac{6}{2\pi} \int_{\pi/3}^{2\pi/3} V_{m,L-L} \sin \theta d\theta \quad (6.1)$$

Atau

$$V_{dc} = \frac{3V_{m,L-L}}{\pi} = 0,955V_{m,L-L} \quad (6.2)$$

Dimana $V_{m,L-L}$ merupakan tegangan maksimum *line to line*. Sedangkan nilai tegangan luaran rms (V_L) dapat dinyatakan

$$V_L = \sqrt{\frac{3}{\pi} \int_{\pi/3}^{2\pi/3} (V_{m,L-L} \sin \theta)^2 d\theta} \quad (6.3)$$

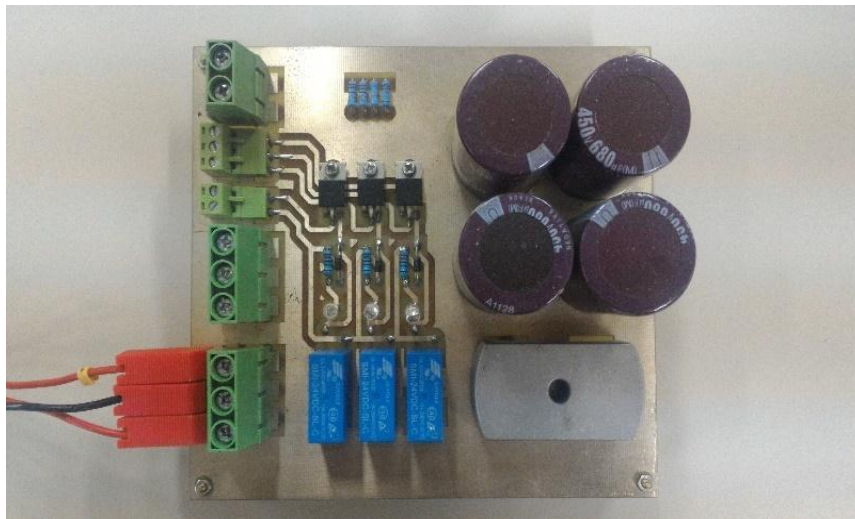
Untuk mengurangi riak yang dihasilkan pada rangkaian penyearah maka dibutuhkan filter kapasitor, dimana nilai kapasitor yang harus dipasang harus ditentukan berdasarkan tegangan yang diterima dan besar riak yang diijinkan. Berdasarkan hasil pengukuran, pada saat emulator turbin angin di atur untuk kecepatan angin sebesar 12m/s, tegangan keluaran yang dihasilkan oleh PMSG sebesar 151 V_{L-L} . Tegangan keluaran PMSG akan menjadi masukan untuk penyearah dan dengan beban resistif 110 Ω maka dengan menggunakan persamaan 6.2 akan menghasilkan tegangan rata-rata (V_{dc})

$$\begin{aligned} V_{(dc)} &= 0,955V_{m,LL} \\ &= 0,955 \times \sqrt{2} \times 151 \\ &= 203,94 \text{ V} \end{aligned}$$

Jika Tegangan riak yang diinginkan adalah 1% dari tegangan output , sehingga nilai kapasitor (C) yang harus dipasang sebesar:

$$\begin{aligned}
V_{ripple} &= V_m - V_L \\
&= \sqrt{2}V_{LL} - \sqrt{2}V_{LL}e^{-t/RC} \\
&= \sqrt{2}V_{LL}(1 - e^{-t/RC}) \quad , \text{ karena } t \ll RC \\
&= \sqrt{2}V_{LL}(1 - (1 - t/RC)) \\
&= \sqrt{2}V_{LL}(t/RC) \quad , \\
&\text{discharge capacitor pada FWR 3 fasa adalah } \frac{1}{6fRC} \\
&= \sqrt{2}V_{LL} \times \frac{1}{6fRC} \\
V_{ripple} &= \sqrt{2}V_{LL} \times \frac{1}{6fRC} \\
1\% \times 203,94 &= \sqrt{2} \times 151 \times \frac{1}{6 \times 50 \times 110 \times C} \\
C &= 3030 \mu F
\end{aligned}$$

Dengan mempertimbangkan nilai kapasitor yang ada di pasaran maka pada peralatan ini menggunakan 4 buah kapasitor dengan nilai 680 μ F dan dihubungkan paralel, sehingga nilai total kapasitor sebesar 2720 μ F. Gambar 6.6 menunjukkan rangkaian penyearah yang digunakan pada penelitian ini.



Gambar 6. 6 Rangkaian Penyearah Yang Digunakan Pada Eksperimen

6.5 Detektor arus dan Tegangan

Detektor arus dan tegangan berfungsi untuk mendeteksi arus dan tegangan keluaran dari penyearah. Tegangan dan arus keluaran dari rangkaian penyearah

akan menjadi masukan untuk algoritma MPPT yang tersimpan di dalam mikrokontroler. Keluaran dari sensor arus dan tegangan terhubung dengan *analog to digital conversion* (ADC) mikrokontroler.

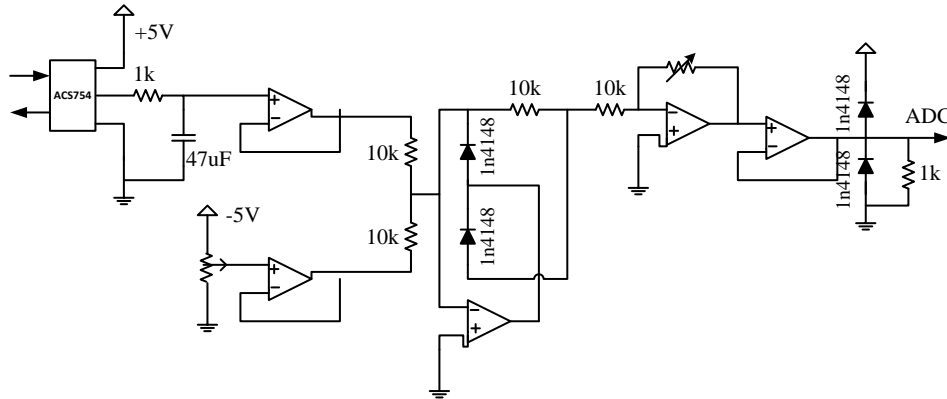
6.5.1 Detektor Arus

Pada peralatan penelitian ini detektor arus menggunakan IC ACS754XCB yang merupakan *hall effect current sensor*. ACS754XCB merupakan sensor arus yang telah banyak digunakan di industri, otomotif dan sistem komunikasi karena memiliki tingkat kepresisian yang baik untuk pembacaan arus AC maupun DC. Beberapa fitur penting dari sensor arus ACS754 antara lain :

- a. Jalur sinyal analog yang rendah noise.
- b. Bandwidth perangkat diatur melalui pin filter yang baru
- c. Waktu naik keluaran 5 mikrodetik dalam menanggapi langkah masukan aktif
- d. Bandwith 35 kHz
- e. Total error keluaran 1,5% pada $T_A = 25^\circ$, dan 4% pada -40° C sampai 85° C
- f. Bentuk yang kecil, paket SOIC8 yang kompak.
- g. Resistansi internal $100\ \mu\Omega$
- h. Operasi catu daya tunggal 5 V
- i. Sensitivitas keluaran 36 – 42,8 mV/A
- j. Tegangan keluaran sebanding dengan arus AC atau DC

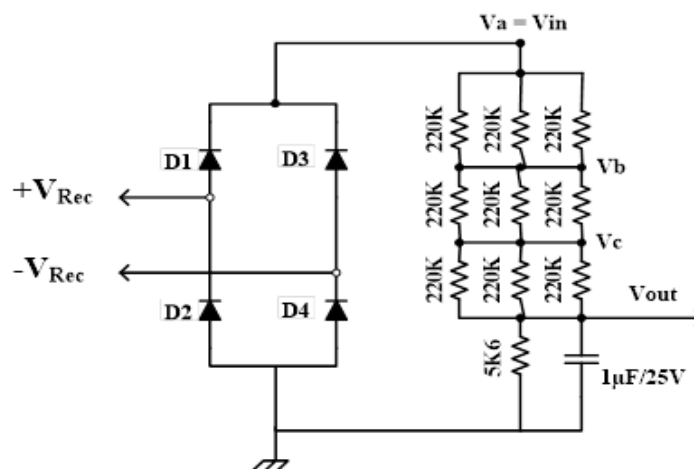
Detektor arus ACS754XCB membutuhkan catu daya sebesar 5V dengan jangkauan tegangan keluaran 0 hingga 5V, sehingga untuk dapat dibaca oleh mikrokontroler maka keluaran komponen ini harus dihubungkan dengan ADC 10 bit pada mikrokontroler yang memiliki sensitivitas 4,88 mV/step dengan tegangan 5V analog maksimal. Berdasarkan karakteristik ACS754XCB, komponen ini dapat digunakan untuk pembacaan arus AC dan DC sehingga pada kondisi 0 Ampere akan menghasilkan tegangan keluaran sebesar 2,5V dan setiap kenaikan arus 1 Ampere akan menghasilkan perubahan tegangan keluaran sebesar 36 - 42,8mV. Pada penelitian ini, ACS754XCB digunakan untuk mendeteksi arus

Gambar 6. 7 Detektor Arus dan Pengkondisi Sinyal



Gambar 6. 7 Detektor Arus dan Pengkondisi Sinyal

6.5.2 Detektor Tegangan



Gambar 6. 8 Rangkaian Detektor Tegangan

Detektor tegangan berfungsi untuk mendeteksi tegangan keluaran penyearah dimana tegangan keluaran ini akan digunakan pada algoritma MPPT sebagai metode optimasi untuk menentukan *duty cycle* pada konverter boost. Oleh karena keluaran dari detektor tegangan ini merupakan sinyal analog maka perlu dihubungkan dengan ADC mikrokontroler. Detektor tegangan disusun menggunakan konsep pembagi tegangan antara 2 buah resistansi. Namun, pada resistansi 1 merupakan hasil hubungan seri dan paralel antara 9 buah resistor seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.8. Jika tegangan keluaran penyearah maksimal sebesar 200V dan tegangan keluaran maksimal detektor yang direncanakan maksimal tidak lebih dari 5V, maka nilai komponen yang digunakan dapat ditentukan.

Nilai resistansi R1 hingga R9 ditentukan sebesar 220K Ω dan nilai kapasitor yang digunakan sebesar 1 μ F. Sedangkan perhitungan nilai R2 yang digunakan dapat ditentukan dengan menggunakan metode mesh dengan asumsi kapasitor sebagai rangkaian terbuka.

Dengan acuan pada titik V_b

$$\begin{aligned} 3 \left(\frac{V_b - V_a}{220K} \right) + 3 \left(\frac{V_b - V_c}{220K} \right) &= 0 \\ V_b - V_a + V_b - V_c &= 0 \\ V_b &= \frac{V_a + V_c}{2} \end{aligned} \quad (6.4)$$

Dengan Acuan titik V_c

$$\begin{aligned} 3 \left(\frac{V_c - V_b}{220K} \right) + 3 \left(\frac{V_c - V_d}{220K} \right) &= 0 \\ V_c - V_b + V_c - V_d &= 0 \\ 2V_c &= V_b + V_d \end{aligned} \quad (6.5)$$

Tinjauan titik V_c

Dengan mensubstitusikan pers (6.1) ke (6.2) akan didapatkan

$$3V_c = V_a + 2V_d \quad (6.6)$$

Tinjauan titik V_d

$$3 \left(\frac{V_c - V_b}{220K} \right) + \frac{V_d}{R_2} = 0 \quad (6.7)$$

Dengan tegangan keluaran rangkaian sensor tegangan maksimal (V_d) sebesar 5V pada tegangan masukan (V_a) sebesar 200V dan mensubstitusikan pers (6.3) ke pers (6.4) akan didapatkan nilai R_2 sebesar 5,64K Ω . Dengan mempertimbangkan ketersediaan nilai komponen resistor yang ada di pasaran, maka digunakan nilai resistor untuk R_2 sebesar 5K6 Ω . Dengan penggunaan nilai tersebut maka tegangan maksimal detektor tegangan yang akan diterima oleh ADC mikrokontroler sebesar 4.96V. Sehingga rangkaian detektor ini memiliki sensitivitas sebesar 24,8mV/V. Gambar 6.9 menunjukkan peralatan detektor arus dan tegangan yang digunakan untuk eksperimen pada penelitian ini.

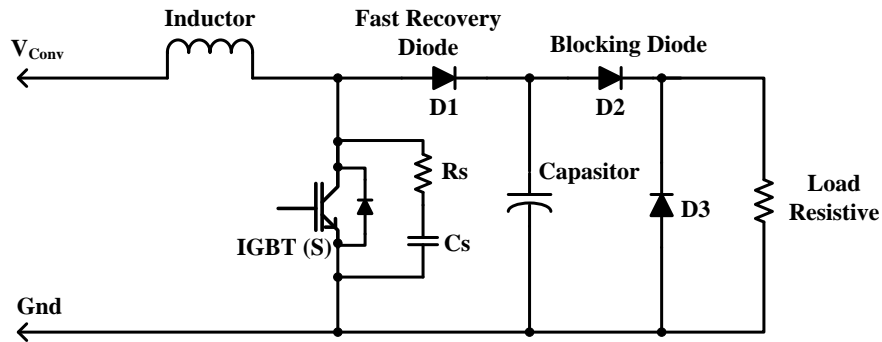


Gambar 6. 9 Detektor Arus Dan Tegangan

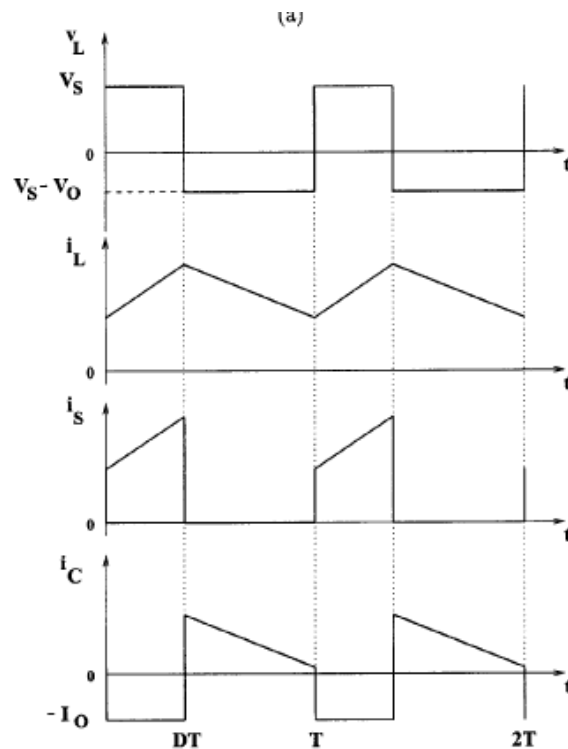
6.6 Konverter Boost

Konverter boost merupakan salah satu rangkaian konverter DC/DC yang akan mengkonversi suatu tegangan DC menjadi tegangan DC lain yang lebih besar. Rangkaian konverter boost terdiri dari sumber tegangan DC sebagai masukan, dioda, kapasitor, induktor, beban dan saklar yang dapat berupa MOSFET ataupun IGBT. Tegangan keluaran yang dihasilkan tergantung pada *duty cycle* dari pulsa PWM yang diberikan pada saklar. Pada penelitian ini konverter boost digunakan untuk menaikkan tegangan keluaran rangkaian penyearah. *Duty cycle* dari konverter boost ditentukan oleh metode optimasi yang digunakan untuk mendapatkan titik daya maksimum dari sistem turbin angin pada kecepatan angin tertentu. *Duty cycle* akan ditentukan dengan menggunakan mikrokontroler. Rangkaian konverter boost yang digunakan pada penelitian ini, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.10. Ketika saklar S tertutup, arus pada

induktor akan naik secara linier dan dioda D1 akan off pada waktu tersebut. Ketika saklar S terbuka, energi yang tersimpan mengalir melalui dioda ke beban. Dioda D2 dan D3 berfungsi sebagai pengaman terhadap arus balik dari beban. Prinsip kerja konverter boost ditunjukkan melalui gelombang tegangan dan arus keluaran induktor seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.11.



Gambar 6. 10 Rangkaian Boost Converter



Gambar 6. 11 Bentuk Gelombang Konverter Boost

Berdasarkan tegangan pada induktor dan menggunakan hukum faraday untuk konverter boost didapatkan

$$V_s.DT = (V_{out} - V_s)(1-D)T \quad (6.8)$$

Dengan menyelesaikan pers (5.5) akan didapatkan transfer fungsi untuk konverter boost yaitu

$$M_v = \frac{V_{out}}{V_s} = \frac{1}{1-D} \quad (6.9)$$

Penentuan *duty cycle* dilakukan pada mikrokontroler sehingga pengaturan frekuensi PWM juga tergantung pada pengaturan frekuensi PWM mikrokontroler yang dilakukan dengan menentukan f_{ocn} PWM. Mikrokontroler yang digunakan memiliki *clock* dengan frekuensi (f_{clk}) sebesar 8MHz dengan nilai *prescaler* (N) sebesar 1. Sehingga f_{ocn} PWM dapat ditentukan menggunakan persamaan

$$f_{ocn} \text{ PWM} = \frac{f_{clk}}{N \times 256} \quad (6.10)$$

Dengan menggunakan persamaan (6.8) maka didapatkan frekuensi *duty cycle* untuk konverter boost sebesar 31,25 KHz. Dengan menggunakan spesifikasi perancangan konverter boost seperti yang ditunjukkan pada Tabel 6.3.

Tabel 6. 3 Spesifikasi perancangan konverter boost

Spesifikasi		Nilai
Tegangan masukan minimal	V_{in_min}	50V
Tegangan masukan maksimal	V_{in_max}	160V
Tegangan keluaran	V_{out}	400V
Tegangan riak	ΔV_o	0,1%
Daya keluaran maksimal	P_{out}	500 W
Tegangan forward dioda	V_f	2,6 V
Frekuensi PWM	f	31,25 KHz

Dengan tegangan keluaran maksimal yang akan dicapai sebesar 400V dan tegangan masukan minimal dari rangkaian penyearah sebesar 50 V maka *duty cycle* maksimal yang dibutuhkan dapat ditentukan sebesar

$$V_{out} = \frac{V_s}{1-D} \quad (6.11)$$

$$400 = \frac{50}{1-D}$$

$$D = 0,875$$

Berdasarkan tegangan keluaran dan daya keluaran maksimal yang ditentukan maka beban maksimal yang dibutuhkan dapat ditentukan

$$R = \frac{V_{out}^2}{P} \quad (6.12)$$

$$= \frac{400^2}{500} = 320 \, \Omega$$

Arus rata-rata induktor dapat ditentukan dengan

$$I_L = \frac{V_s}{(1-D)^2 \times R} \quad (6.13)$$

$$= \frac{50}{(1-0.875)^2 \times 320} = 10 \, A$$

Nilai induktor yang digunakan dapat ditentukan

$$\Delta I_L = 1\% \times I_L(average) \quad (6.14)$$

$$= 0,1 \times 10 \, A = 1 \, A$$

$$L = \frac{1}{f} \times (V_o - V_s) \times \left(\frac{V_s}{V_o}\right) \times \frac{1}{\Delta I_L} \quad (6.15)$$

$$L = \frac{1}{31,24K} \times (400 - 50) \times \left(\frac{50}{400}\right) \times \frac{1}{1}$$

$$= 1,4mH$$

Jika tegangan riak yang diijinkan sebesar 0,1% maka nilai kapasitor dapat ditentukan

$$\Delta V_{out} = 0,1\% \times V_o$$

$$= 0,001 \times 400V = 0,4V$$

$$C = \frac{V_{out} \times D}{R \Delta V_{out} f} \quad (6.16)$$

$$C = \frac{400 \times 0.875}{320 \times 0.4 \times 31,24K} \approx 87,52 \mu F$$

Nilai rangkaian snubber yang terhubung pada IGBT dapat ditentukan dengan persamaan

$$C_{snubber} \approx \frac{I_{on} \times T_{fall}}{2 \times V_{off}} \quad (6.17)$$

Dimana

$$V_{off} = V_s + V_{out} = 50 + 400 = 450 \, V$$

$$I_{on} = I_L = 10A$$

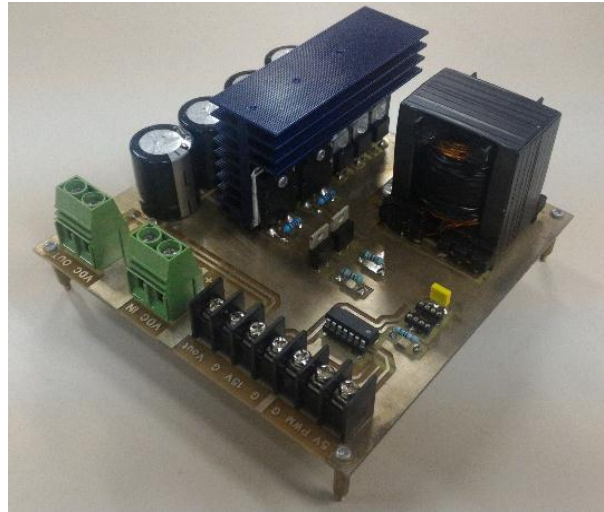
$$C_{snubber} \approx \frac{10 \times (29 \times 10^{-9})}{2 \times 450} \approx 0,32nF$$

$$R_{snubber} < \frac{DT}{2 \times C_{snubber}} \quad (6.18)$$

$$R_{snubber} < \frac{0.875 \times \left(\frac{1}{31,24 \times 10^3} \right)}{2 \times (0,32 \times 10^{-9})}$$

$$R_{snubber} < 43,764 \text{ K}\Omega$$

Gambar 6.12 menunjukkan peralatan konverter boost yang telah digunakan dalam eksperimen pada penelitian ini



Gambar 6. 12 Konverter Boost

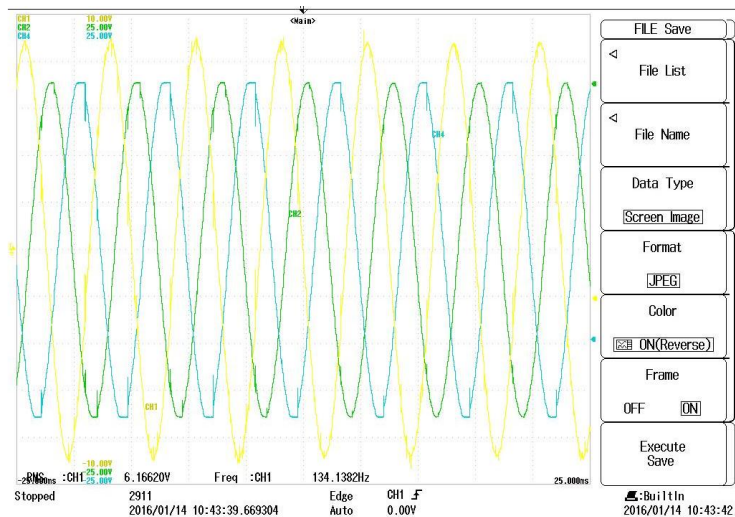
6.7 Pengujian Peralatan Turbin Angin

Pengujian peralatan turbin angin ini bertujuan untuk menganalisis kinerja sistem turbin angin yang telah dibuat sebelum mengimplementasikan algoritma optimasi daya maksimum. Pengujian dilakukan pada setiap blok sistem yang terdiri dari rangkaian penyearah 3 fasa, detector arus, detector tegangan, konverter boost dan karakteristik daya turbin angin dengan PMSG. Prototipe sistem turbin angin yang telah didesain merupakan sistem turbin angin skala kecil dengan daya maksimum 500W dan pada pengujian menggunakan beban resistif murni. Kecepatan angin disimulasikan menggunakan emulator turbin angin dengan mengatur motor induksi melalui VSD sehingga dapat menggerakkan generator.

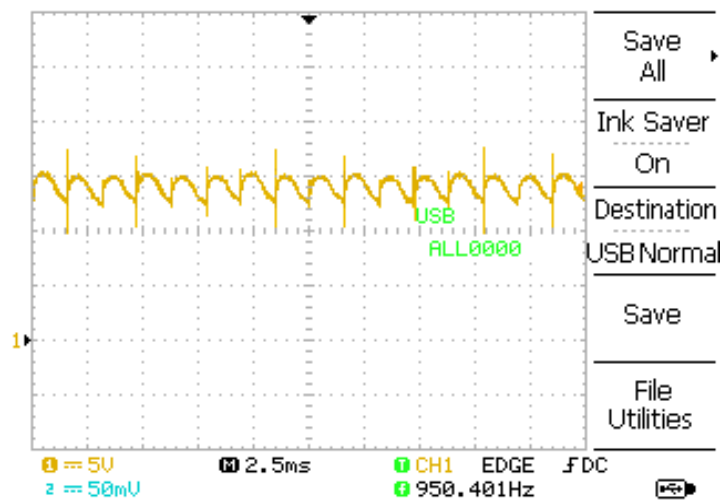
6.7.1 Hasil Pengujian Penyearah 3 Fasa Tidak Terkendali

Penyearah 3 fasa tidak terkendali yang telah didesain diuji untuk mengetahui performansi yang dihasilkan. Penyearah 3 fasa mendapatkan tegangan masukan dari PMSG berupa sinyal AC tiga fasa dan akan disearahkan menjadi sinyal DC. Gambar 6.13 menunjukkan hasil pengukuran tegangan keluaran

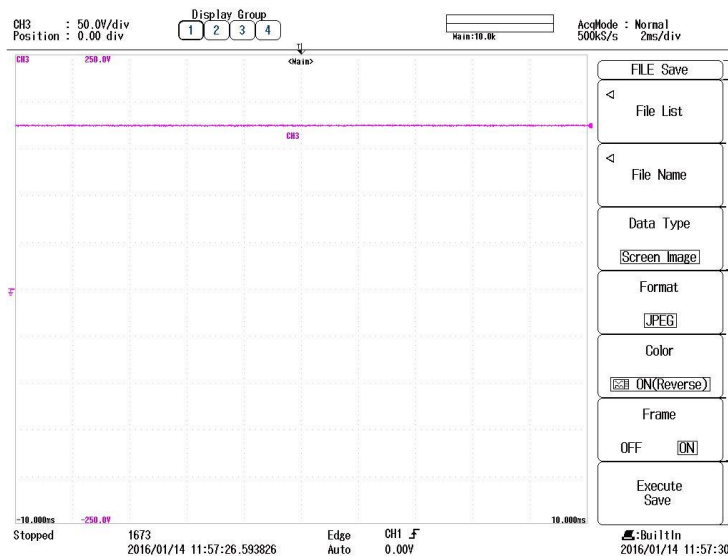
PMSG tanpa beban dengan menggunakan osiloskop. Tegangan keluaran PMSG berbentuk sinusoidal murni dan dalam kondisi seimbang sebesar 200Vp-p. Tujuan dari rangkaian penyearah adalah menghasilkan tegangan DC dengan riak sekecil mungkin. Untuk mengurangi riak pada tegangan keluaran maka diperlukan filter kapasitor. Gambar 6.14 menunjukkan tegangan keluaran penyearah tanpa menggunakan filter kapasitor.



Gambar 6. 13 Tegangan Keluaran PMSG Tanpa beban



Gambar 6. 14 Tegangan Keluaran Penyearah Tanpa Filter Kapasitor



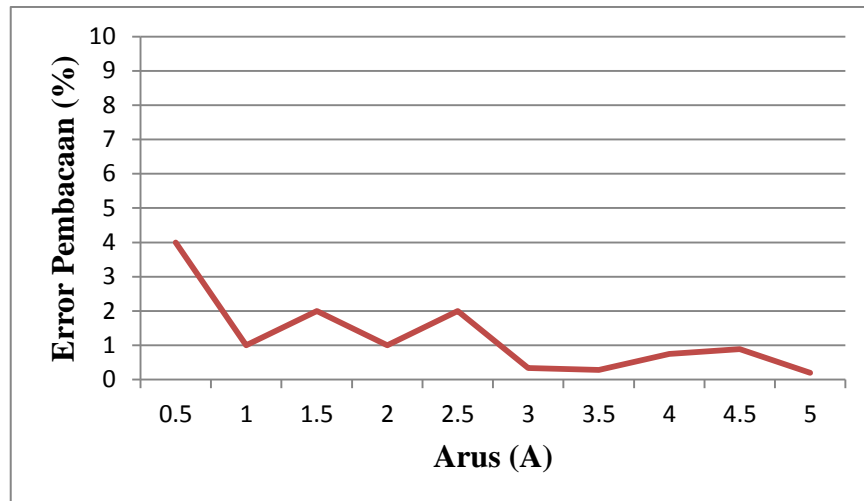
Gambar 6. 15 Tegangan Keluaran Penyearah Dengan filter Kapasitor

Tanpa menggunakan filter kapasitor, tegangan keluaran penyearah menghasilkan riak sebesar 30V. Berdasarkan perhitungan untuk filter kapasitor pada penyearah menggunakan kapasitor sebesar 2720 μ F dan dihasilkan tegangan keluaran penyearah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.15. Dengan tegangan phase maksimal pada PMSG sebesar 100V maka tegangan line maksimal ($V_{m,L-L}$) akan sebesar 173,2V. Berdasarkan persamaan (6.2) maka tegangan rata-rata (V_{dc}) yang dihasilkan oleh penyearah sebesar 165,41V. Berdasarkan Gambar 6.15, dengan penggunaan filter kapasitor, tegangan yang dihasilkan memiliki riak yang sangat kecil sekali dan dapat diabaikan sedangkan tegangan rata-rata yang dihasilkan sebesar 160V. Jika dibandingkan dengan hasil perhitungan memiliki error sekitar 5,41V atau 3,27%, hal ini disebabkan perbedaan penggunaan komponen yang tidak sesuai dengan perhitungan karena menyesuaikan dengan komponen yang ada di pasaran.

6.7.2 Hasil Pengujian Detektor Arus

Pengujian detektor arus bertujuan untuk mengevaluasi kinerja dari peralatan yang telah didesain dan dibuat. Pengujian dilakukan pada peralatan

turbin angin yang telah didesain dan memberikan variasi perubahan arus yang diukur dan dibandingkan dengan alat ukur ampermeter “B&K Precision”. Detektor arus diuji menggunakan variasi arus dari 0 hingga 5A dengan kenaikan setiap 0,5A. Gambar 6.16 menunjukkan hasil pengujian detektor arus.



Gambar 6. 16 Hasil Pengujian Detektor Arus

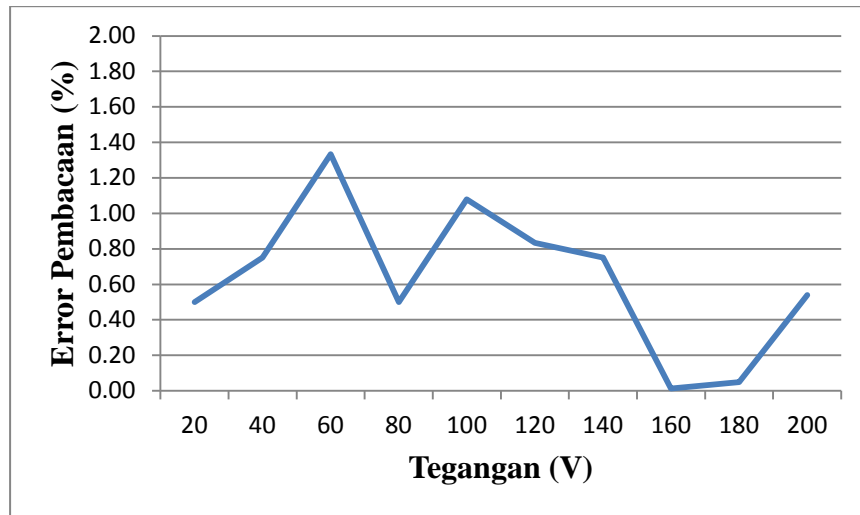
Berdasarkan hasil pengujian, dapat terlihat dengan perubahan nilai arus yang bervariasi dari 0A hingga 5A menghasilkan error maksimum sebesar 4% pada pengukuran arus 0,5A. Error pembacaan arus semakin kecil dengan pengukuran arus yang semakin besar. Rata-rata error pembacaan yang dihasilkan sebesar 3,94%.

6.7.3 Hasil Pengujian Detektor Tegangan

Seperti halnya pada pengujian detektor arus, pengujian detektor tegangan juga dilakukan untuk mengkalibrasi dan mengevaluasi peralatan yang telah di desain dan dibuat. Detektor tegangan diuji menggunakan peralatan turbin angin dan hasil pengukuran dibandingkan dengan alat ukur voltmeter “B&K precision”. Pengujian dilakukan dengan jangkauan tegangan pengukuran antara 0 - 200V dan variasi tegangan setiap 20V. Gambar 6.17 menunjukkan hasil pengujian detektor tegangan terhadap error pembacaan yang dihasilkan.

Berdasarkan hasil pengujian, detektor tegangan menghasilkan error terbesar pada pengukuran tegangan 60V sebesar 1,33%. Secara keseluruhan, error

pembacaan detektor tegangan memiliki nilai rata-rata sebesar 0.63%. Pengambilan data tabel pengukuran sensor tegangan di atas dilakukan ketika kondisi semua modul emulator turbin angin terhubung, sehingga terlihat riak yang dihasilkan oleh masing-masing sensor cukup berpengaruh pada pembacaan sensor.

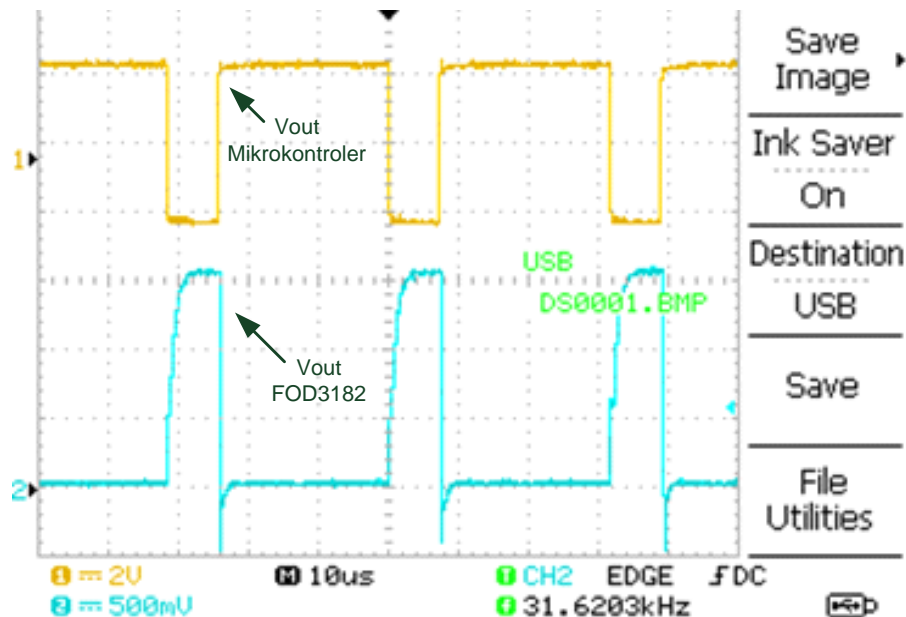


Gambar 6. 17 Hasil Pengujian Detektor Tegangan

6.7.4 Hasil Pengujian Konverter Boost

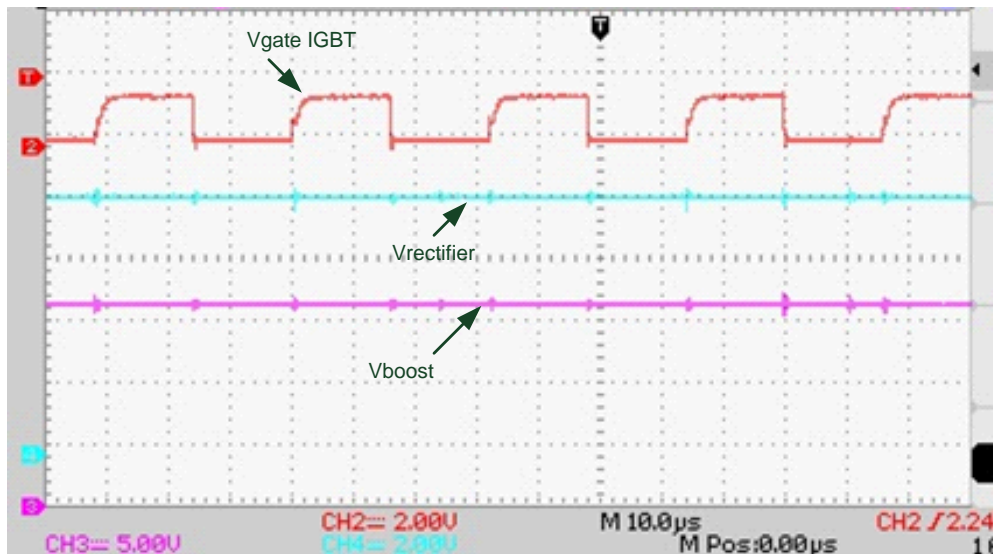
Pengujian konverter boost bertujuan untuk mengetahui performansi rangkaian yang telah direncanakan dan dibuat. Konverter boost terhubung dengan penyearah sebagai masukan dan beban pada sisi keluaran. Tegangan keluaran yang dihasilkan oleh konverter boost tergantung pada *duty cycle* yang ditentukan pada mikrokontroler. Sinyal PWM dengan *duty cycle* tertentu dihubungkan dengan komponen *switching* pada rangkaian ini. Komponen *switching* yang digunakan merupakan *Insulated gate bipolar transistor* (IGBT), dimana *gate* komponen terhubung pada mikrokontroler melalui rangkaian optocoupler menggunakan FOD3182 sebagai rangkaian antarmuka antara IGBT dengan mikrokontroler. Tegangan *gate* IGBT memiliki bentuk yang sama dengan tegangan keluaran *optocoupler* FOD3182, namun berkebalikan dengan tegangan keluaran mikrokontroler karena logika “ON” pada FOD3182 adalah aktif “Low”.

Gambar 6.18 menunjukkan tegangan keluaran PWM dari mikrokontroler dan tegangan masukan pada *gate* IGBT.



Gambar 6. 18 Bentuk Tegangan Keluaran PWM Mikrokontroler dan Tegangan *Gate* IGBT

Sinyal PWM yang dihasilkan oleh mikrokontroler memiliki frekuensi 31,62KHz dengan amplitudo sebesar 4,5V, sedangkan tegangan *gate* IGBT yang merupakan tegangan keluaran FOD3182 memiliki frekuensi yang sama dengan amplitudo sebesar 15V. Tegangan masukan *gate* IGBT mengalami penumpukan di puncak high, ini disebabkan frekuensi *switching* dari mikrokontroler cukup tinggi jika dibandingkan dengan kecepatan *switching* frekuensi IGBT. Kecepatan *switching* frekuensi IGBT pada umumnya bekerja di frekuensi rendah bila dibandingkan dengan Mosfet yang memiliki frekuensi *switching* yang lebih cepat. Namun IGBT memiliki keunggulan yaitu tahan terhadap temperatur tinggi dan kondisi fluktuasi beban yang berubah – ubah.



Gambar 6. 19 Hasil Pengujian Pulsa PWM, Tegangan Keluaran Penyearah dan Tegangan Keluaran Konverter Boost.

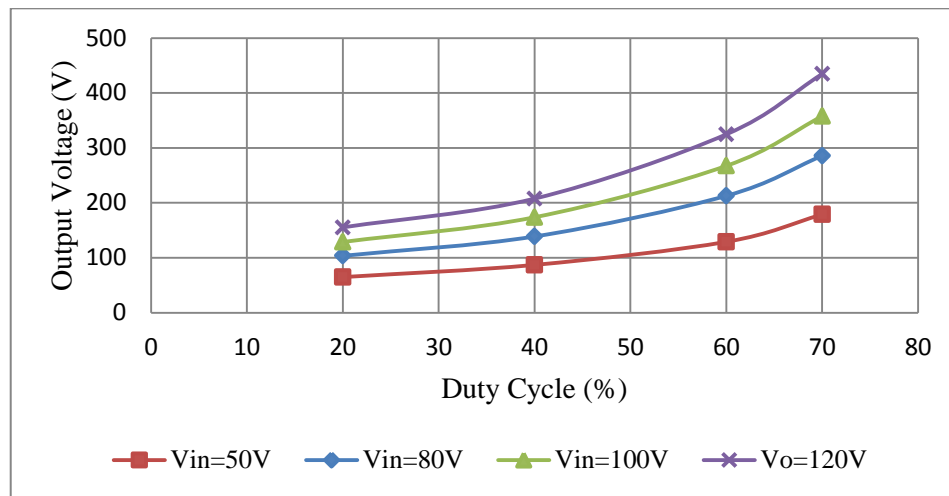
Gambar 6.19 menunjukkan hasil pengujian rangkaian konverter boost dengan memberikan pulsa PWM dari mikrokontroler dan kecepatan rotasi PMSG sebesar 500Rpm. Pulsa PWM memiliki *duty cycle* sebesar 0,5. Emulator turbin angin diatur hingga PMSG menghasilkan kecepatan rotasi sebesar 500Rpm, yang di ukur dengan menggunakan tachometer. Pada kecepatan putar 500Rpm, rangkaian penyearah akan menghasilkan tegangan keluaran sebesar 84V. Berdasarkan persamaan 6.11, tegangan keluaran konverter boost yang dihasilkan dapat ditentukan sebesar

$$V_{out} = \frac{V_s}{1-D}$$

$$V_{out} = \frac{84}{1-0,5} = 168V$$

Sedangkan berdasarkan hasil pengujian nilai tegangan keluaran konverter boost sebesar 165V sehingga terdapat selisih dengan perhitungan sebesar 3V atau 1,78%. Gambar 6.20 menunjukkan hubungan tegangan keluaran konverter boost dan *duty cycle* yang diberikan untuk beberapa variasi tegangan masukan. Perbandingan antara hasil pengukuran dan perencanaan ditunjukkan pada Tabel 6.4. Dibandingkan dengan perhitungan teori dalam perencanaan, hasil pengukuran yang didapatkan terdapat selisih tegangan keluaran yang dihasilkan dengan error rata-rata sebesar 5,07%. Selisih ini terjadi karena toleransi nilai

komponen dan juga ketersediaan komponen yang ada di pasaran sehingga tidak dapat sesuai dengan nilai perhitungan.

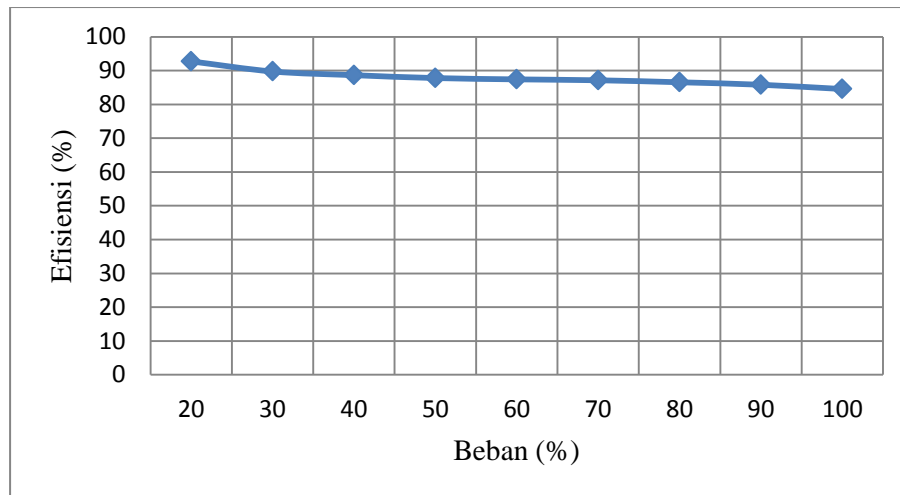


Gambar 6. 20 *Duty Cycle* dan Tegangan Keluaran Yang Dihasilkan Untuk Beberapa Tegangan Masukan Pada Konverter Boost

Tabel 6. 4 Perbandingan Kinerja Konverter Boost Antara Perencanaan dan Pengujian

D (%)	Vin (V)	Iin (A)	Vo (V)	Io (A)	Vo(Teori) (V)	Error Vo (%)
20	50	0,21	64,90	0,16	62,50	3,70
40	50	0,37	87,10	0,21	83,33	4,32
60	50	0,83	129,10	0,31	125	3,18
70	50	1,62	178,80	0,42	166,67	6,79
20	80	0,33	103,60	0,25	100	3,47
40	80	0,59	138,80	0,33	133,33	3,94
60	80	1,42	212,80	0,50	200	6,02
70	80	2,64	285,70	0,68	266,67	6,66
20	100	0,41	128,80	0,31	125	2,95
40	100	0,75	173,80	0,41	166,67	4,10
60	100	1,82	267,30	0,63	250	6,47
70	100	3,30	357,70	0,85	333,33	6,81
20	120	0,40	155,40	0,30	150	3,47
40	120	0,72	207,70	0,40	200	3,71
60	120	1,79	324,70	0,62	300	7,61
70	120	3,73	434,60	0,93	400	7,96

Untuk mengetahui performansi rangkaian konverter boost dapat ditentukan nilai efisiensi berdasarkan hasil pengukuran. Pengujian efisiensi dilakukan dengan memberikan perubahan *duty cycle* untuk beberapa tegangan masukan. Pada implementasi alat penelitian ini, konverter dirancang untuk daya keluaran sebesar 500W. Gambar 6.21 menunjukkan kurva perbandingan efisiensi konverter boost terhadap rasio pembebanan. Efisiensi dapat ditentukan melalui perbandingan antara daya keluaran dan daya masukan konverter boost. Efisiensi dari konverter juga tergantung dari rugi-rugi daya *switching* dan konduksi pada IGBT dan rugi- rugi daya *switching* dan konduksi dioda maupun induktor, dimana daya keluaran konverter selisih antara daya masukan dan rugi-rugi daya tersebut.



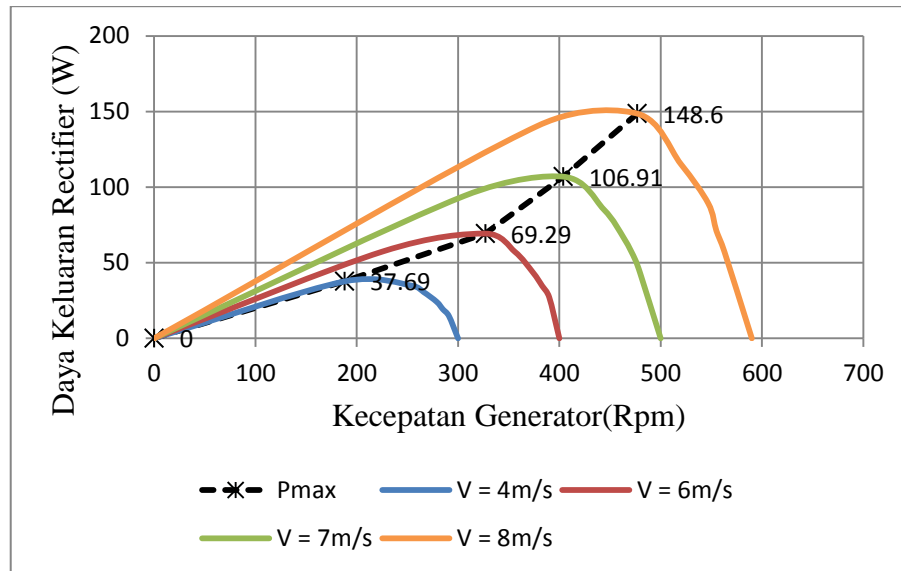
Gambar 6. 21 Perbandingan Rasio Pembebanan Terhadap Efisiensi Daya Keluaran Konverter Boost

Efisiensi rangkaian konverter boost terhadap perubahan rasio pembebanan memiliki jangkauan 84,5% hingga 92,72% dimana semakin besar nilai beban efisiensi rangkaian akan semakin rendah. Efisiensi rata – rata yang dihasilkan adalah 87,82%, namun efisien mengalami penurunan ketika beban mendekati nilai maksimum.

6.7.5 Hasil Pengujian Karakteristik Daya Turbin Angin

Untuk menentukan performansi algoritma MPPT yang diimplementasikan pada peralatan turbin angin, maka diperlukan karakteristik peralatan turbin angin tanpa algoritma MPPT sebagai pembanding. Oleh karena itu perlu ditentukan kurva karakteristik daya penyearah terhadap kecepatan generator untuk kecepatan

angin tertentu. Kecepatan angin disimulasikan dengan menggunakan emulator turbin angin melalui pengaturan motor induksi untuk mendapatkan kecepatan PMSG yang sesuai untuk kecepatan angin tertentu. Pengujian dilakukan untuk empat kecepatan angin yaitu 4m/s, 6m/s, 7m/s dan 8m/s yang didapat dengan mengatur emulator turbin angin hingga generator berputar pada kecepatan 300Rpm, 400 Rpm, 500 Rpm, dan 600 Rpm.



Gambar 6. 22 Kurva Karakteristik Daya Penyearah Terhadap Kecepatan Generator

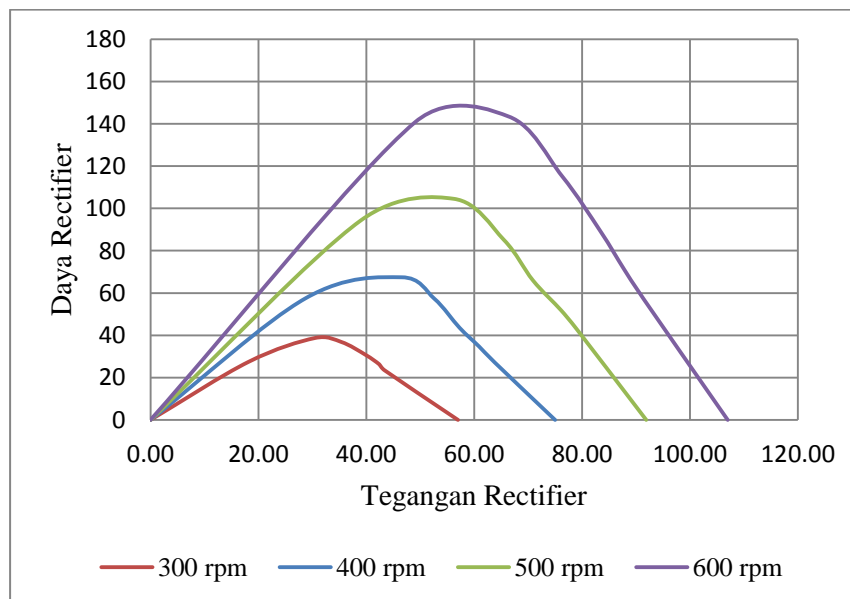
Penggunaan motor induksi sebagai emulator turbin angin dapat menghasilkan bentuk kurva karakteristik dengan titik puncak pada kecepatan tertentu. Hal ini karena motor induksi dikontrol dengan VSD dengan mode kontrol tegangan dan frekuensi kerja dari motor dibuat konstan sehingga akan menyebabkan besar torsi maksimum yang dihasilkan motor induksi tidak lebih dari frekuensi dan tegangan kerja yang diberikan. Kondisi ini sama dengan kondisi turbin angin *real*, yaitu torsi maksimum yang di hasilkan sebanding dengan kecepatan sapuan angin yang menyentuh sudut dari *blade* turbin angin dan luas area sapuan dari turbin angin tersebut. Pemodelan turbin angin pada motor induksi dapat digunakan untuk pengujian algoritma MPPT pada skala emulator laboratorium. Gambar 6.22 menunjukkan kurva karakteristik daya keluaran penyearah terhadap kecepatan generator berdasarkan hasil pengukuran. Pengujian

dilakukan dengan memberikan perubahan *duty cycle* antara 0,1 hingga 0,8 pada kecepatan angin tertentu dengan beban konstan. Berdasarkan hasil pengukuran untuk setiap kecepatan tertentu didapatkan nilai maksimum.

Berdasarkan kurva karakteristik daya penyearah terhadap kecepatan generator, untuk setiap kecepatan angin tertentu maka sistem turbin angin memiliki nilai maksimum tertentu pula. Pada kecepatan angin 4m/s, dimana generator berputar pada kecepatan 300 Rpm memiliki daya maksimum sebesar 37.69w. Demikian pula pada kecepatan angin yang lain, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 6.5.

Tabel 6. 5 Daya Maksimum Berdasarkan Hasil Pengukuran

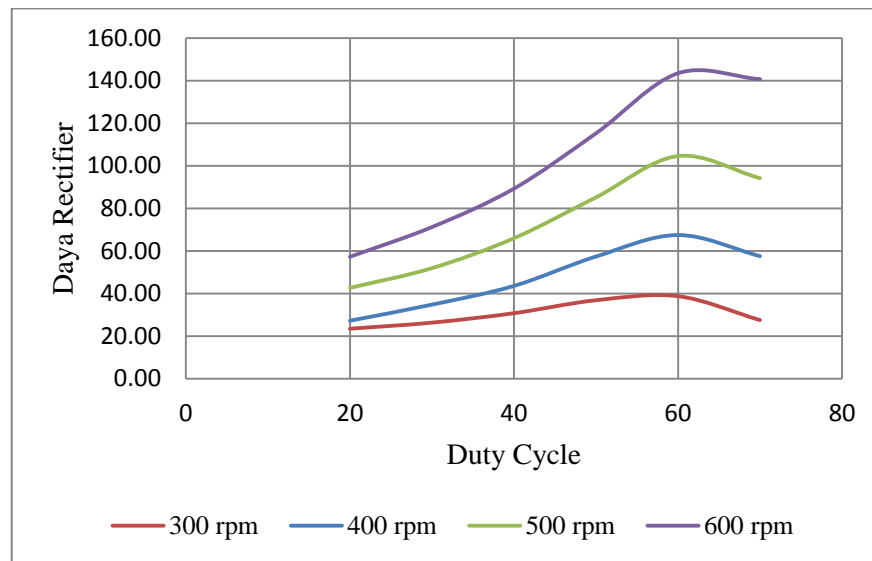
No	Kecepatan Angin	Kecepatan generator	Daya Maksimum
1	4 m/s	300 Rpm	37,69 w
2	6 m/s	400 Rpm	69,29 w
3	7 m/s	500 Rpm	106,91 w
4	8 m/s	600 Rpm	148,6 w



Gambar 6. 23 Kurva Karakteristik Daya Penyearah Terhadap Tegangan Penyearah.

Gambar 6.23 menunjukkan kurva daya penyearah terhadap tegangan keluaran penyearah. Dari Gambar 6.23 dapat di lihat bahwa titik puncak

maksimum dari setiap kecepatan generator akan dihasilkan pada tegangan tertentu. Kurva karakteristik ini merupakan dasar dalam implementasi algoritma MPPT pada mikrokontroler Arduino mega 2560. Gambar 6.24 menunjukkan kurva hubungan antara daya penyearah terhadap perubahan *duty cycle* pada *switching* konverter boost dengan beban konstan. Kenaikan *duty cycle* akan menghasilkan daya yang berbeda di setiap stepnya, dengan mengatur *duty cycle* maka titik puncak disetiap perubahan kecepatan akan mencapai titik optimum.



Gambar 6. 24 Kurva Karakteristik Daya Penyearah Terhadap *Duty cycle*

6.8 Implementasi MPPT Pada Peralatan Turbin Angin

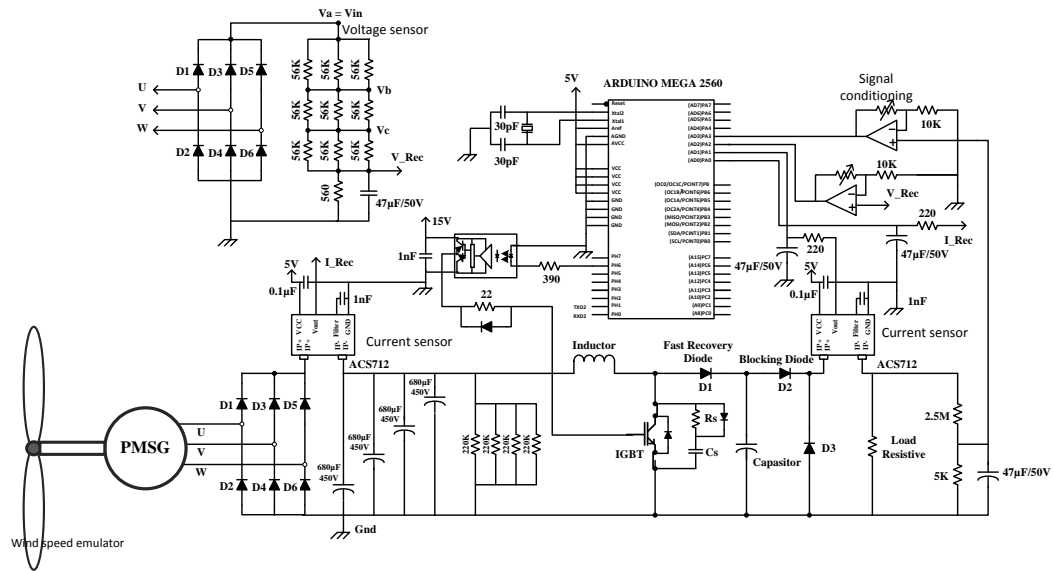
Algoritma yang telah diuji melalui simulasi diimplementasikan pada sistem *embedded* menggunakan mikrokontroler Arduino 2560. Arduino bersifat *open source* yang merupakan kombinasi antara peragkat keras, bahasa pemrograman dan *Integrated Development Environment* (IDE). IDE merupakan sebuah perangkat lunak yang berfungsi untuk menulis program, meng-*compile* menjadi kode biner dan meng-*upload* ke dalam memori mikrokontroler. Pada penelitian ini menggunakan Arduino mega 2560 yang merupakan chip ATmega 2560. Arduino tipe ini memiliki 54 pin digital *input/output* yang terdiri dari 15 pin yang dapat digunakan sebagai *output* PWM, 16 *input* analog, 4 serial antar muka, 16 MHz *crystal oscillator*, koneksi USB, catu daya, ICSP *header*, dan tombol *reset*. Kelebihan Arduino Mega 2560 yaitu memiliki *flash memory* yang

cukup besar sehingga dapat menampung algoritma MPPT dan kontroler yang digunakan, memiliki ADC internal dan pin PWM. Spesifikasi Arduino Mega 2560 seperti yang ditunjukkan pada Tabel 6.6.

Pada penelitian ini, mikrokontroler arduino mega berfungsi untuk mengeksekusi algoritma MPPT dan merekam data tegangan dan arus keluaran penyearah dan tegangan dan arus keluaran konverter boost. Beberapa algoritma algoritma MPPT telah disimulasikan dan dijelaskan pada bab 4. Berdasarkan hasil simulasi, ditentukan algoritma MPPT yang akan diimplementasikan berdasarkan performansi dan kecepatan pencarian titik daya maksimum. Algoritma MPPT yang akan diimplementasikan pada mikrokontroler ini yaitu *modified* P&O yang akan dibandingkan dengan algoritma P&O dan *modified Firefly*. Diagram alir untuk algoritma *modified* P&O seperti ditunjukkan pada Gambar 4.23. Sedangkan diagram alir untuk algoritma P&O dan *modified Firefly* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.10 dan Gambar 4.18.

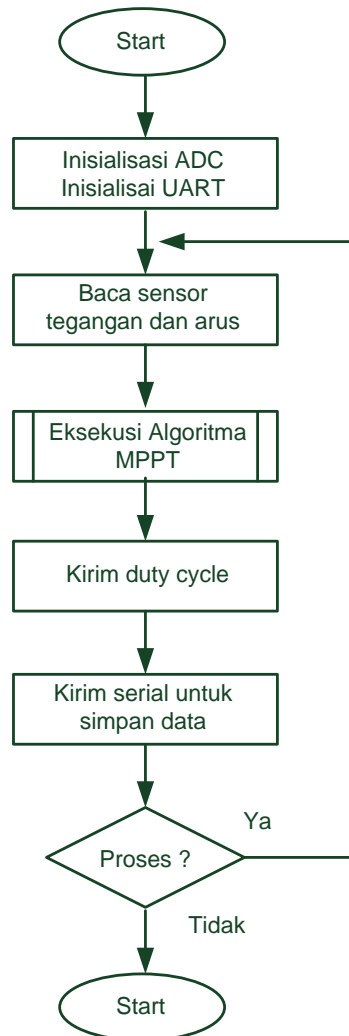
Tabel 6. 6 Spesifikasi Arduino Mega 2560

Spesifikasi	keterangan
<i>Microcontroller</i>	ATmega2560
<i>Operating Voltage</i>	5V
<i>Input Voltage (recommended)</i>	7-12V
<i>Input Voltage (limits)</i>	6-20V
<i>Digital I/O Pins</i>	54 (of which 15 provide PWM output)
<i>Analog Input Pins</i>	16
<i>DC Current per I/O Pin</i>	40 mA
<i>DC Current for 3.3V Pin</i>	50 mA
<i>Flash Memory</i>	256 KB of which 8 KB used by bootloader
<i>SRAM</i>	8 KB
<i>EEPROM</i>	4 KB
<i>Clock Speed</i>	16 MHz



Gambar 6. 25 Rangkaian Elektronik Pada Sistem Turbin Angin

Gambar 6.25 menunjukkan gambar skematik rangkaian keseluruhan sistem turbin angin dengan beban resistif dengan menggunakan mikrokontroler arduino mega. Rangkaian keseluruhan terdiri dari penyearah dioda 3 fasa, filter kapasitor, detektor arus dan tegangan, rangkaian driver IGBT, konverter boost dan mikrokontroler. Filter kapasitor berfungsi untuk mengurangi riak pada tegangan keluaran penyearah. Arus keluaran penyearah diukur secara kontinyu dan dihubungkan ke mikrokontroler melalui pin analog (PA0), sedangkan keluaran arus konverter boost diukur dan dihubungkan pada pin PA1 pada mikrokontroler. Tegangan penyearah dan konverter boost diukur dan dihubungkan ke mikrokontroler pada pin PA2 dan PA3. Tegangan dan arus keluaran penyearah dan boost konverter dibaca dan direkam oleh mikrokontroler. Mikrokontroler akan mengambil data tegangan dan arus penyearah secara kontinyu dengan periode pencuplikan sebesar 0,2 ms. Berdasarkan tegangan dan arus penyearah ditentukan daya keluaran penyearah dan digunakan untuk menentukan *duty cycle* pada konverter boost berdasarkan algoritma MPPT yang digunakan. Mikrokontroler mengirim sinyal PWM melalui pin PWM 9 dengan *duty cycle* tertentu untuk mengaktifkan IGBT pada konverter boost melalui rangkaian penggerak IGBT yang berupa opto-transistor.



Gambar 6. 26 Diagram Alir Pemrograman Mikrokontroler

Diagram alir pemrograman pada mikrokontroler Arduino Mega seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.26. Arduino akan membaca semua data sensor arus dan tegangan, yang kemudian digunakan untuk mengeksekusi algoritma MPPT. Hasil dari algoritma MPPT, arduino akan mengirim sinyal PWM dan menyimpan data pembacaan sensor menggunakan *port serial*. Proses akan terus berlangsung hingga dihentikan.

6.9 Hasil Implementasi Ekstraksi Daya Maksimum Dengan Algoritma *Modified Perturb&observe*

Algoritma yang telah disimulasikan untuk mengekstraksi daya maksimum pada sistem turbin angin, diimplementasikan pada sistem turbin angin skala laboratorium. Berdasarkan hasil simulasi, algoritma *modified* perturb & observe menghasilkan waktu pencarian yang lebih cepat dan kemampuan untuk mencapai daya maksimum lebih baik. Pada implementasi ini, algoritma *modified* P&O digunakan untuk mengekstraks daya maksimum dengan memberikan kecepatan angin konstan dan kecepatan angin berubah. Pengujian kecepatan angin konstan yang dilakukan pada kecepatan angin 4m/s, 6m/s, 7m/s dan 8m/s dan kecepatan angin berubah dari 4m/s hingga 8m/s. Pengujian dilakukan dengan merekam arus dan tegangan keluaran penyearah dan konverter boost menggunakan osiloskop, multimeter dan personal komputer. Hasil pengujian algoritma *modified* P&O dibandingkan dengan algoritma P&O dan *modified Firefly* yang telah dibahas dan disimulasikan pada bab sebelumnya.

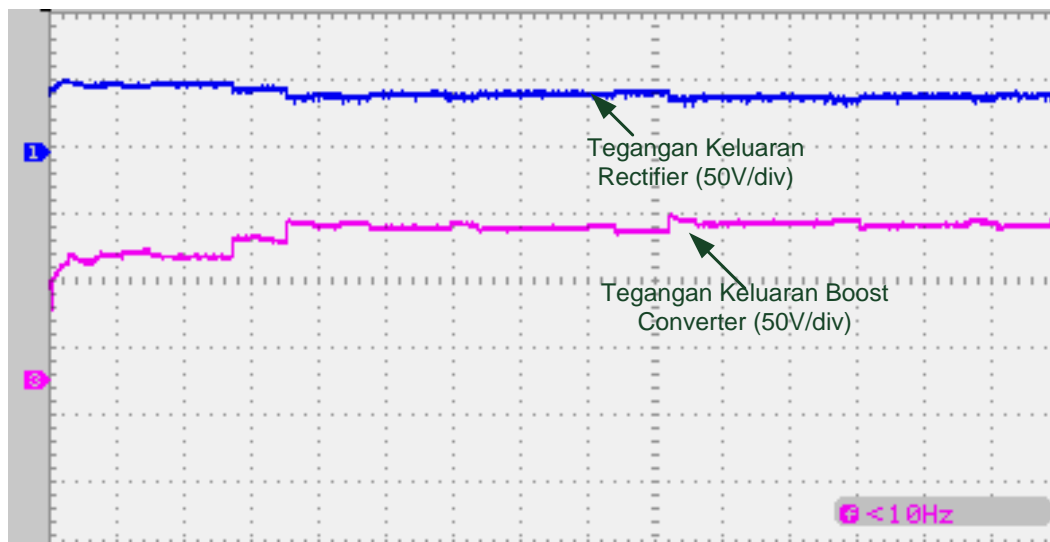
Berdasarkan Fathabadi[103], efisiensi ekstraksi daya maksimum dapat ditentukan berdasarkan perbandingan antara daya yang dihasilkan oleh turbin angin menggunakan MPPT dan daya yang dihasilkan oleh turbin angin tanpa MPPT, seperti yang telah dijelaskan sebelumnya dan ditunjukkan pada Gambar 6.22. Efisiensi ekstraksi daya maksimum dapat dinyatakan dengan

$$\text{Efisiensi} = \frac{\text{Daya Maksimum Yang Diekstrak Dengan MPPT}}{\text{Daya Maksimum tanpa MPPT}} \times 100\% \quad (6.19)$$

6.9.1 Hasil Pengujian Pada Kecepatan Angin Konstan

Pengujian algoritma *modified* P&O dilakukan dengan memberikan kecepatan angin konstan sebesar 4m/s, 6m/s, 7m/s dan 8m/s yang setara dengan kecepatan generator 300 Rpm, 400 Rpm, 500 Rpm dan 600 Rpm. Kecepatan angin 4m/s didapatkan melalui pengaturan emulator turbin angin. Emulator turbin angin diatur hingga mampu menggerakkan PMSG pada kecepatan 300Rpm. Gambar 6.27 menunjukkan hasil pengukuran dengan osiloskop untuk tegangan keluaran konverter boost dan penyearah pada sistem turbin angin dengan menggunakan algoritma *modified* P&O yang telah dibahas pada Bab 4. Tegangan keluaran penyearah yang dihasilkan dengan kecepatan generator

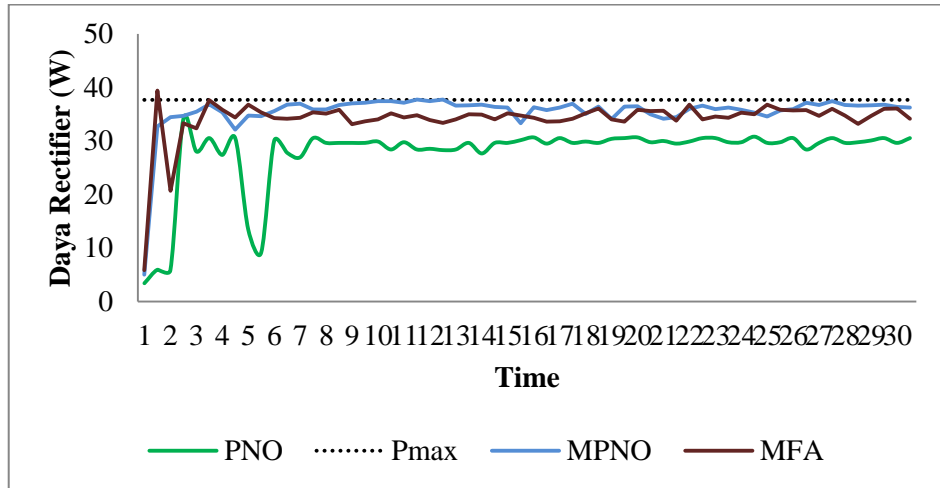
300Rpm sekitar 48V dan tegangan keluaran konverter boost sekitar 145V dengan *duty cycle* sekitar 0,66 atau 66%. Hal ini sesuai dengan karakteristik daya penyearah dan *duty cycle* yang telah dijelaskan sebelumnya jika pada kecepatan generator 300 Rpm, daya penyearah maksimum akan dicapai pada *duty cycle* sekitar 60% atau 0,6.



Gambar 6. 27 Hasil Pengukuran Tegangan Keluaran Penyearah dan onverter Boost Pada Kecepatan Generator 300 Rpm Dengan Algoritma *Modified P&O*

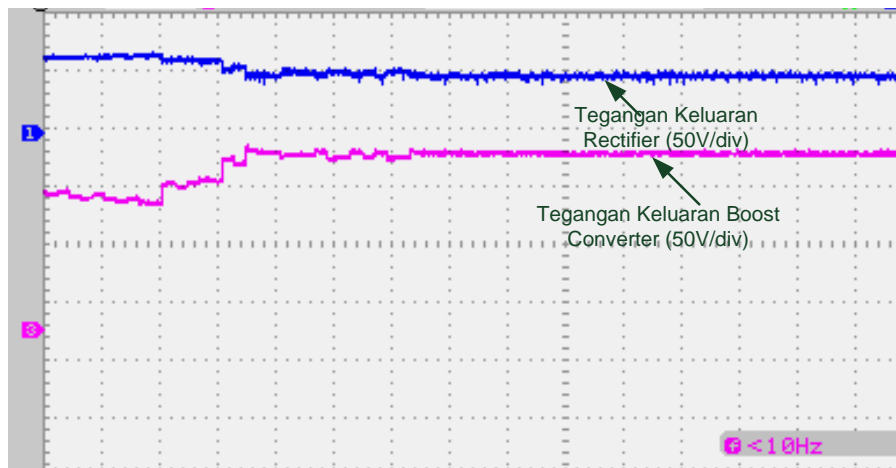
Gambar 6.28 menunjukkan perbandingan daya keluaran yang dihasilkan penyearah menggunakan algoritma *modified P&O*, *P&O* dan *modified firely* pada kecepatan generator 300 Rpm. Berdasarkan hasil pengukuran, algoritma *P&O* dapat mencari titik daya maksimum rata-rata sebesar 27,87W, sedangkan algoritma *modified Firefly* dapat mendeteksi daya maksimum pada 34,18W. Algoritma *modified P&O* menghasilkan daya maksimum yang lebih besar dibandingkan kedua metode yang lain yaitu sebesar 35,50W. Berdasarkan kurva karakteristik hasil pengukuran, pada kecepatan generator 300 Rpm memiliki daya keluaran penyearah maksimum sebesar 37,69W. Dengan menggunakan persamaan 6.16 maka efisiensi sistem turbin angin dengan menggunakan algoritma *modified P&O*, *P&O* dan *modified Firefly* sebesar 94,18%, 73,93% dan

90,68%. Perubahan *duty cycle* juga mempengaruhi fluktuasi dari daya *tracking* yang di hasilkan.

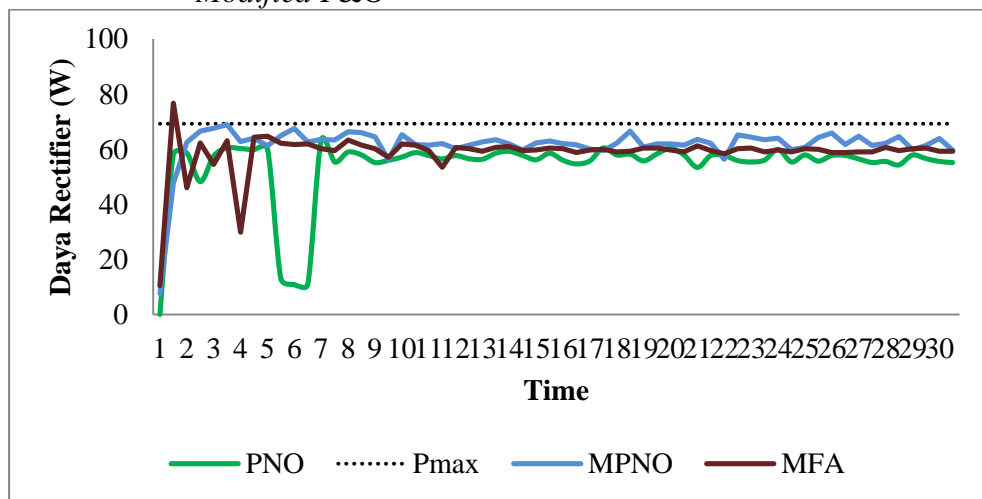


Gambar 6. 28 Hasil Implementasi Algoritma MPPT Pada Kecepatan Generator 300 Rpm

Gambar 6.29 menunjukkan menunjukkan hasil pengukuran dengan osiloskop untuk tegangan keluaran konverter boost dan penyearah pada sistem turbin angin dengan menggunakan algoritma *modified* P&O pada kecepatan generator 400 Rpm. Semakin besar kecepatan generator akan menghasilkan tegangan keluaran penyearah yang semakin besar pula. Tegangan keluaran penyearah yang dihasilkan dengan kecepatan generator 400Rpm sekitar 55V dan tegangan keluaran konverter boost sekitar 155V dengan *duty cycle* sekitar 0,64 atau 64%. Berdasarkan karakteristik daya penyearah dan *duty cycle*, pada kecepatan generator 400 Rpm, daya penyearah maksimum akan dicapai pada *duty cycle* sekitar 60% atau 0,6.



Gambar 6. 29 Hasil Pengukuran Tegangan Keluaran Penyearah dan Konverter Boost Pada Kecepatan Generator 400 Rpm Dengan Algoritma *Modified P&O*

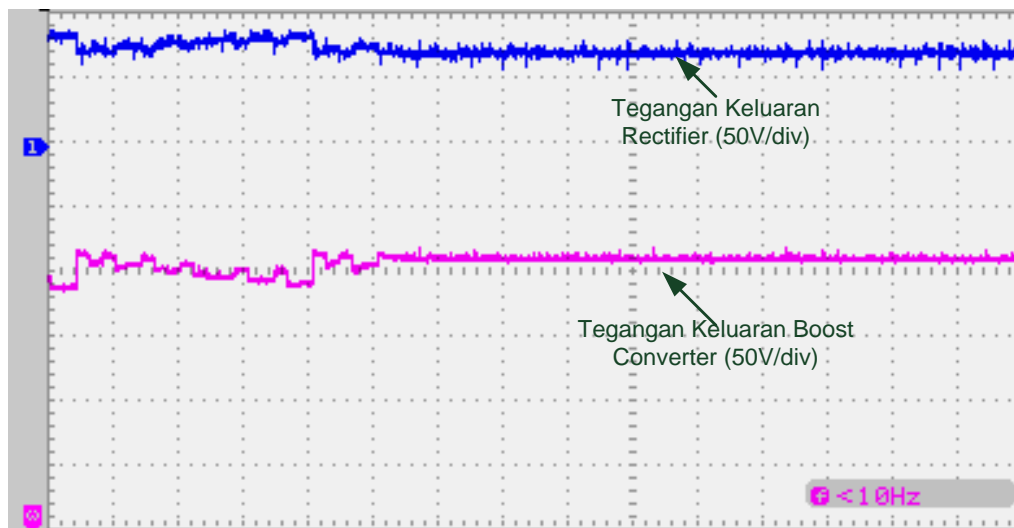


Gambar 6. 30 Hasil Implementasi Algoritma MPPT Pada Kecepatan Generator 400 Rpm

Berdasarkan hasil pengukuran, pengujian pada kecepatan generator 400 Rpm, algoritma P&O dapat mencapai titik daya maksimum rata-rata sebesar 53,96W, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.30. Algoritma *modified Firefly* dapat mendeteksi daya maksimum yang lebih besar dibandingkan algoritma P&O yaitu sebesar 58,77W. Algoritma *modified P&O* menghasilkan daya maksimum yang lebih besar dibandingkan kedua metode yang lain yaitu sebesar 61,59W. Berdasarkan kurva karakteristik hasil pengukuran, daya keluaran penyearah maksimum yang dihasilkan pada kecepatan generator 400 Rpm sebesar 69,29W. oleh karena itu efisiensi sistem turbin angin dengan menggunakan algoritma

modified P&O, P&O dan *modified Firefly* dapat ditentukan sebesar 88,88%, 77,87% dan 84,81%.

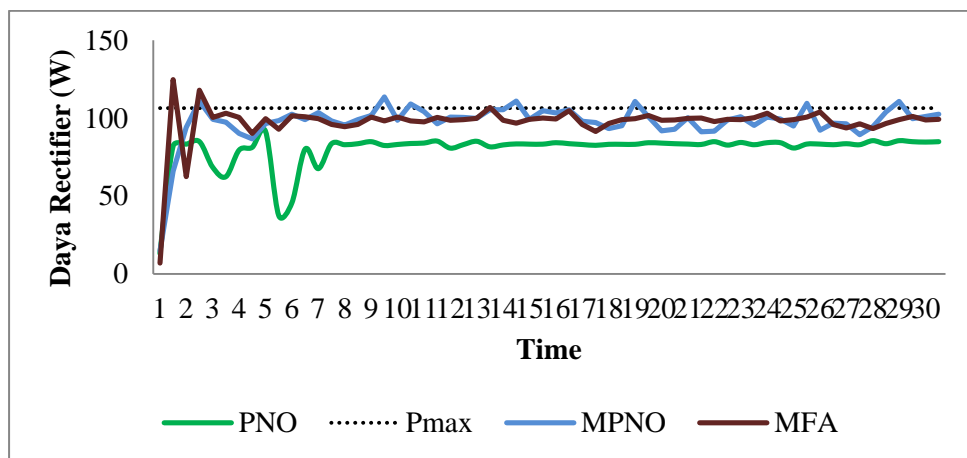
Gambar 6.31 menunjukkan hasil pengukuran dengan osiloskop untuk tegangan keluaran konverter boost dan penyearah pada sistem turbin angin dengan menggunakan algoritma *modified* P&O pada kecepatan generator 500 Rpm. Berdasarkan kurva karakteristik hasil pengukuran untuk daya penyearah dan *duty cycle*, pada kecepatan generator 500 Rpm, sistem turbin angin akan mencapai daya maksimum pada *duty cycle* sekitar 60%. Sedangkan berdasarkan hasil pengukuran dengan osiloskop, tegangan keluaran penyearah sekitar 68V dan tegangan keluaran konverter boost sebesar 210V. Dengan tegangan keluar sebesar itu maka konverter boost bekerja dengan *duty cycle* sebesar 67%. Pada awal pengukuran, tegangan yang dihasilkan melonjak, hal ini dikarenakan algoritma *modified* P&O membutuhkan waktu untuk mencari *duty cycle* yang sesuai untuk mendapatkan titik daya maksimum.



Gambar 6. 31 Hasil Pengukuran Tegangan Keluaran Penyearah dan Konverter Boost Pada Kecepatan Generator 500 Rpm Menggunakan *Modified* P&O

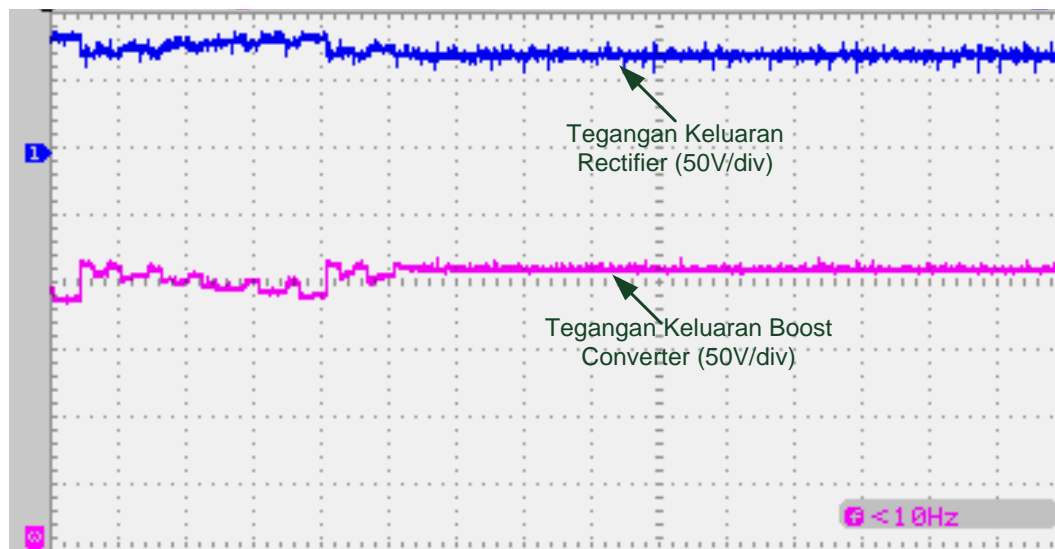
Gambar 6.32 menunjukkan daya keluaran penyearah yang dihasilkan dengan menggunakan algoritma *modified* P&O, *modified Firefly*, P&O dan daya keluaran maksimal berdasarkan karakteristik hasil pengukuran, dimana sebesar 106,4W. Secara implementasi dengan kecepatan generator 500 Rpm, algoritma

P&O dapat mencapai daya maksimum rata-rata sebesar 80,09W. Sedangkan algoritma *modified Firefly* dapat mencapai daya maksimum yang lebih besar yaitu 97,42W dan algoritma *modified P&O* sebesar 97,7W. Berdasarkan persamaan 5.16, efisiensi kinerja dari masing-masing algoritma dapat ditentukan, dimana algoritma P&O memiliki efisiensi 75,27 %, algoritma *modified Firefly* sebesar 91,55% dan algoritma *modified P&O* sebesar 91,8%. Efisiensi yang dihasilkan algoritma *modified Firefly* dan *modified P&O* mendekati sama namun waktu pencarian yang dibutuhkan algoritma *modified P&O* lebih cepat.



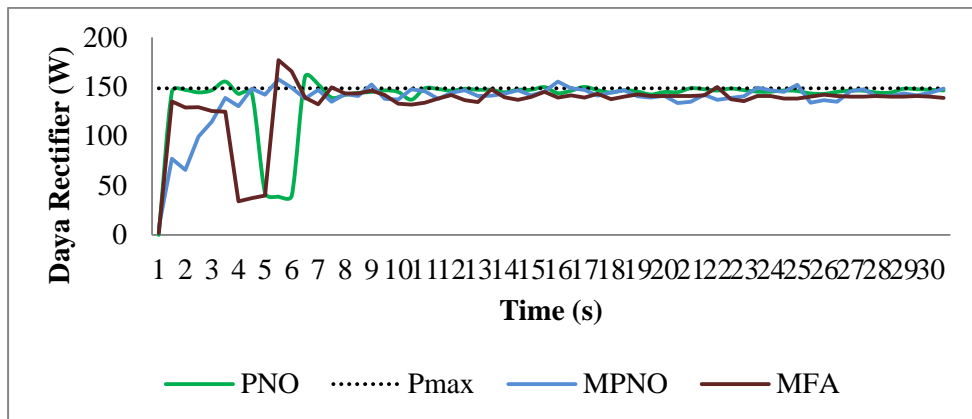
Gambar 6. 32 Hasil Implementasi Algoritma MPPT Pada Kecepatan Angin 7m/s

Pengujian implementasi algoritma *modified P&O* juga dilakukan pada kecepatan generator 600 Rpm yang setara dengan kecepatan angin 8m/s. Tegangan keluaran penyearah dan konverter boost diukur dengan menggunakan osiloskop seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.33. Tegangan keluaran penyearah yang dihasilkan dengan menerapkan algoritma *modified P&O* sebesar 75V dan tegangan keluaran konverter boost sebesar 215V dengan *duty cycle* rata-rata yang diterima konverter boost sebesar 0,65 atau 65%. Nilai *duty cycle* ini mendekati nilai *duty cycle* optimum untuk mendapatkan daya maksimum berdasarkan kurva karakteristik, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.24.



Gambar 6. 33 Hasil Pengukuran Tegangan Keluaran Penyearah dan Konverter Boost Pada Kecepatan Generator 600 Rpm Menggunakan *Modified P&O*

Berdasarkan hasil pengukuran, pengujian pada kecepatan generator 600 Rpm, algoritma P&O dapat mencapai titik daya maksimum rata-rata sebesar 138,44W, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.34. Algoritma *modified Firefly* dapat mendeteksi daya maksimum yang lebih rendah dibandingkan algoritma P&O yaitu sebesar 132,76W. Sedangkan Algoritma *modified P&O* menghasilkan daya maksimum yang lebih besar dibandingkan *modified Firefly* yaitu sebesar 137,04W. Berdasarkan kurva karakteristik hasil pengukuran, daya keluaran penyearah maksimum yang dihasilkan pada kecepatan generator 600 Rpm sebesar 148,6W. Sehingga efisiensi sistem turbin angin dengan menggunakan algoritma *modified P&O*, P&O dan *modified Firefly* dapat ditentukan sebesar 92,22%, 93,16% dan 89,34%.



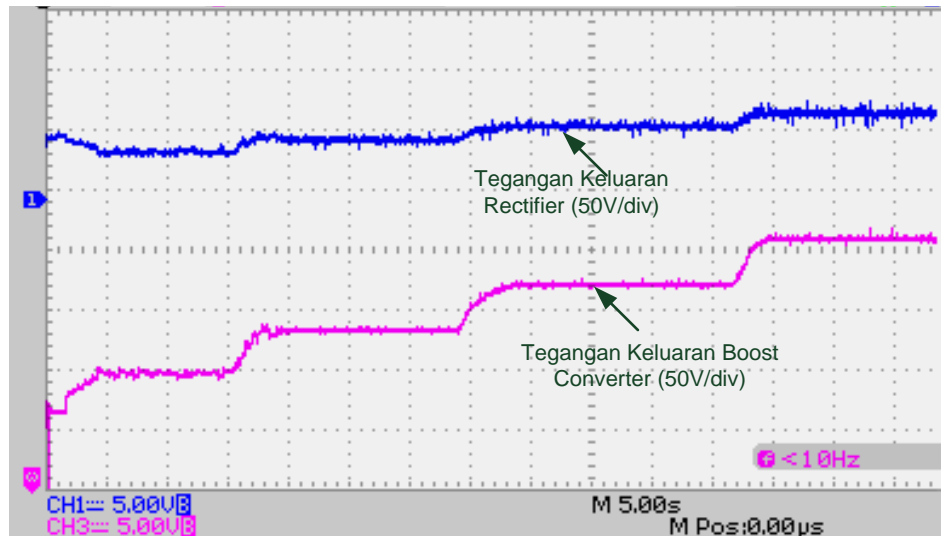
Gambar 6. 34 Hasil Implementasi Algoritma MPPT Pada Kecepatan Generator 600 Rpm

6.9.2 Hasil Pengujian Implementasi *Modified* P&O Sebagai MPPT Pada Kecepatan Angin Berubah

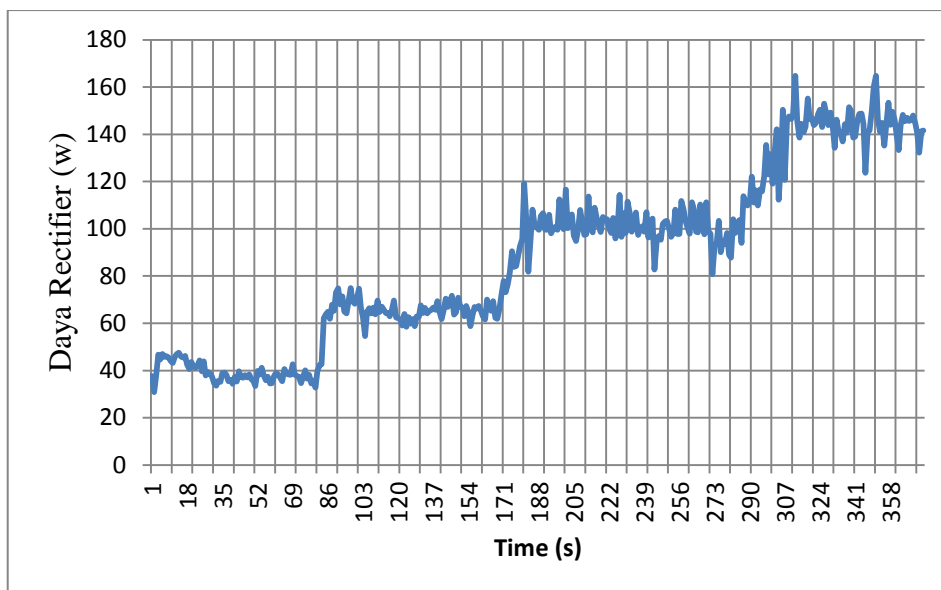
Kecepatan angin selalu berubah dan tidak menentu, oleh karena itu algoritma MPPT harus dapat mendeteksi perubahan kecepatan angin tersebut dan mencari titik daya maksimum pada setiap kecepatan angin dengan cepat. Untuk menguji kinerja algoritma *modified* P&O dilakukan uji eksperimen dengan memberikan perubahan kecepatan generator dari 300 Rpm ditingkatkan menjadi 400 Rpm, 500 Rpm dan 600 Rpm secara berturut-turut. Perubahan kecepatan generator yang setara dengan perubahan kecepatan angin dilakukan melalui emulator turbin angin dengan mengatur VSD.

Gambar 6.35 menunjukkan tegangan keluaran penyearah dan konverter boost. Tegangan keluaran penyearah dan onverter boost berubah mengikuti perubahan kecepatan generator. Semakin besar kecepatan angin, kecepatan generator akan semakin besar dan tegangan keluaran penyearah dan konverter juga akan semakin besar. Hal ini menunjukkan algoritma *modified* P&O sebagai MPPT dapat mengikuti dan mendeteksi perubahan kecepatan angin dan mencari titik daya maksimum dari turbin angin pada variasi kecepatan angin. Gambar 6.36 menunjukkan daya keluaran penyearah yang dihasilkan dengan menggunakan algoritma *modified* P&O. Daya keluaran penyearah yang dihasilkan untuk setiap kecepatan generator memiliki nilai rata-rata yang sama

dengan daya keluaran penyearah yang dihasilkan pada pengujian kecepatan angin konstan.



Gambar 6. 35 Hasil Pengukuran Tegangan Keluaran Penyearah dan Konverter Boost Pada Kecepatan Angin Berubah



Gambar 6. 36 Hasil Implementasi Algoritma *Modified* P&O Pada Kecepatan Angin Berubah

Perbandingan algoritma P&O, *modified* P&O dan *modified Firefly* yang telah diimplementasikan untuk mengekstraks daya maksimum pada sistem turbin angin skala kecil dengan beban resistif ditunjukkan pada Tabel 6.7. Efisiensi ditentukan dengan menggunakan persamaan 6.19 dan daya optimum ditentukan berdasarkan pengujian karakteristik peralatan turbin angin yang digunakan.

Berdasarkan hasil pengujian untuk empat kecepatan generator, algoritma P&O menghasilkan efisiensi rata-rata sebesar 80,05% dengan waktu pencarian rata-rata sebesar 7,5 detik. Sedangkan algoritma *modified Firefly* memiliki efisiensi rata-rata sebesar 89,15% dengan rata-rata. Algoritma *modified* memiliki efisiensi yang lebih baik dengan waktu pencarian yang lebih cepat.

Turbin angin skala kecil sangat sesuai digunakan untuk daerah terpencil yang tidak terjangkau oleh grid. Salah satu faktor penting yang harus diperhatikan dalam mengimplementasikan turbin angin skala kecil adalah efisiensi dan biaya [108]. Oleh karena itu algoritma MPPT yang dapat diterapkan pada turbin angin skala kecil harus memiliki efisiensi yang tinggi dan biaya yang efisien. Penggunaan algoritma *modified* P&O memiliki keuntungan yaitu efisiensi yang tinggi, struktur yang sederhana sehingga mudah diimplementasikan pada daerah terpencil dan biaya yang efisien karena penggunaan metode ini tidak membutuhkan sensor mekanik untuk pengukuran kecepatan generator dan anemometer untuk pengukuran kecepatan angin. Selain itu dengan algoritma yang sederhana, metode *modified* P&O hanya memanfaatkan arus dan tegangan keluaran penyearah untuk menentukan titik daya maksimum dan tidak membutuhkan memori yang besar serta menghasilkan akurasi yang sama dengan metode *modified Firefly*. Walaupun dibandingkan dengan metode *modified Firefly*, *modified* P&O menghasilkan fluktuasi yang lebih besar.

Tabel 6. 7 Perbandingan Kinerja algoritma *Modified* P&O, *Modifief Firefly* dan P&O.

Algoritma	Kecepatan	Parameter Kinerja Algoritma		
		Daya Optimum	Daya Terdeteksi	Efisiensi
	(rpm)	(W)	(W)	(%)
P & O	300	37,69	27,87	73,93
	400	69,29	59,96	77,87
	500	106,40	80,09	75,27
	600	148,60	138,44	93,16
<i>Modified</i>	300	37,69	35,50	94,18

P&O	400	69,29	61,59	88,88
	500	106,40	97,7	91,55
	600	148,60	137,04	92,22
<i>Modified Firefly</i>	300	37,69	34,18	90,68
	400	69,29	58,77	84,81
	500	106,40	97,42	91,80
	600	148,60	132,76	89,34

BAB 7

PENUTUP

7.1 Kesimpulan

Berdasarkan desain dan hasil pengujian baik berupa simulasi dan pengukuran prototipe terhadap sistem konversi energi angin skala kecil menggunakan PMSG dapat disimpulkan beberapa hal yaitu :

1. Pemodelan kecepatan angin berdasarkan hasil pengukuran kecepatan angin di Nganjuk menggunakan stokastik petri net memiliki hasil yang akurat dengan standar deviasi yang sama dengan hasil pengukuran sebesar 0.88.
2. Pemodelan sistem konversi energi angin dengan skala kecil yang terhubung ke grid terdiri dari rangkaian penyearah dioda tidak terkontrol, konverter boost, *voltage source inverter* (VSI), konverter *bidirectional* dan baterai. Penggunaan topologi ini memudahkan dalam pengaturan, sederhana, efektif dan efisien dalam pembiayaan.
3. Berdasarkan hasil simulasi, metode *modified Firefly* memiliki respon yang lebih cepat untuk mengekstrak daya maksimum tanpa menggunakan sensor kecepatan angin dan kecepatan turbin angin dibandingkan metode PSO dan P&O. Metode *modified Firefly* dapat mempertahankan turbin angin bekerja

pada daya optimal terhadap variasi kecepatan angin dengan nilai C_p sebesar 0,48. Sedangkan metode P&O menghasilkan performansi yang paling rendah namun memiliki kompleksitas algoritma yang paling sederhana.

4. Berdasarkan hasil implementasi algoritma MPPT pada prototipe SKEA *stand alone* dengan menggunakan mikrokontroler, algoritma *modified* P&O menghasilkan efisiensi rata-rata sebesar 91,7% sedangkan algoritma *modified Firefly* menghasilkan efisiensi rata-rata sebesar 89,15%. Efisiensi terendah dihasilkan oleh algoritma P&O sebesar 80,05% dengan fluktuasi yang lebih besar.
5. Strategi kontrol optimal pada SKEA dengan menggunakan baterai dapat menyediakan daya konstan ke grid sesuai dengan kebutuhan terhadap variasi kecepatan angin dan kebutuhan daya grid. Kontrol optimal terdiri dari kontroler MPPT yang berfungsi untuk mengekstrak daya optimal, kontroler konverter *bidirectional* menggunakan kontroler PI yang berfungsi untuk mempertahankan tegangan DC link melalui pengaturan pengisian dan pengosongan baterai dan kontroler *grid side converter* yang berfungsi untuk mengatur daya yang dikirim ke grid sesuai dengan kebutuhan melalui pengaturan *duty cycle* PWM pada VSI.

7.2 Penelitian Selanjutnya

1. Perlu dikembangkan emulator turbin angin yang dapat diatur secara terprogram melalui komputer sehingga dapat meningkatkan akurasi pengujian algoritma kontrol
2. Untuk meningkatkan akurasi penelitian perlu pengujian algoritma kontrol optimal menggunakan pemodelan kecepatan angin dengan stokastik petri net yang telah didesain.
3. Perlu dikembangkan kontrol hirarki untuk mengatur kinerja turbin angin pada daerah 2 dan 3 dari karakteristik turbin angin yang tidak hanya memperhitungkan kebutuhan daya namun juga kondisi SOC baterai sehingga dapat meningkatkan *lifetime* baterai
4. Dalam penelitian ini, perangkat keras yang telah dikembangkan berupa sistem SKEA skala kecil *stand alone* yang dilengkapi dengan algoritma MPPT.

Penelitian ini perlu dikembangkan perangkat keras dan perangkat lunak untuk implementasi kontrol optimal turbin angin PMSG dengan menggunakan baterai sebagai penyimpan energi.

5. Perlu dikembangkan sistem kontrol optimal untuk meningkatkan kemampuan *low voltage ride through* (LVRT) dari sistem SKEA.
6. Pengembangan topologi konverter yang digunakan juga diperlukan untuk meningkatkan efisiensi sistem SKEA

DAFTAR PUSTAKA

- [1] BPPT, “outlook energy Indonesia 2016 - Google Search.” [Online]. Available: https://www.google.co.id/?gws_rd. [Accessed: 30-Apr-2017].
- [2] Global Wind Energy Council. “Global Wind Energy Outlook 2016 GWEC.”, 2017 .
- [3] M. Nasiri, J. Milimonfared, and S. H. Fathi, “Modeling, analysis and comparison of TSR and OTC methods for MPPT and power smoothing in permanent magnet synchronous generator-based *wind turbines*,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 86, pp. 892–900, Oct. 2014.
- [4] Kementrian ESDM, “Indonesia_Energy_Outlook_2013.pdf.” [Online]. Available: <https://www.esdm.go.id> [Accessed: 30-Apr-2017].
- [5] S. G. Varzaneh, G. B. Gharehpetian, and M. Abedi, “Output power smoothing of variable speed wind farms using rotor-inertia,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 116, pp. 208–217, Nov. 2014.
- [6] M. Cheng and Y. Zhu, “The state of the art of wind energy conversion systems and technologies: A review,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 88, pp. 332–347, Dec. 2014.
- [7] J. Hui and P. K. Jain, “Power management and control of a wind energy conversion system (WECS) with a fuzzy logic based maximum power point tracking (MPPT),” in *IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, 2012, pp. 5966–5971.
- [8] Y. Xia, K. H. Ahmed, and B. W. Williams, “Wind turbine Power Coefficient Analysis of a New Maximum Power Point Tracking Technique,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 3, pp. 1122–1132, Mar. 2013.
- [9] M. Rosyadi, S. M. Muyeen, R. Takahashi, and J. Tamura, “Transient stability enhancement of variable speed permanent magnet wind generator using adaptive PI-Fuzzy controller,” in *PowerTech, 2011 IEEE Trondheim*, 2011, pp. 1–6.
- [10] Y. Errami, M. Ouassaid, and M. Maaroufi, “Optimal Power Control Strategy of Maximizing Wind Energy Tracking and Different Operating Conditions for Permanent Magnet Synchronous Generator Wind Farm,” *Energy Procedia*, vol. 74, pp. 477–490, Aug. 2015.
- [11] M. A. Tabrizi and G. Radman, “Detailed dynamic modeling of Permanent Magnet Synchronous machine based *wind turbine* for power system dynamic analysis,” in *2013 Proceedings of IEEE Southeastcon*, 2013, pp. 1–6.
- [12] A. Ali, A. Moussa, K. Abdelatif, M. Eissa, S. Wasfy, and O. P. Malik, “Comparative performance of *wind turbine* driven PMSG with PI-controllers tuned using heuristic optimization algorithms,” in *Energy Conference (ENERGYCON), 2014 IEEE International*, 2014, pp. 120–126.
- [13] J. Chen, T. Lin, C. Wen, and Y. Song, “Design of a Unified Power Controller for Variable-Speed Fixed-Pitch Wind Energy Conversion System,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 8, pp. 4899–4908, 2016.
- [14] Y. Zou and J. He, “Comprehensive modeling, simulation and experimental validation of Permanent Magnet Synchronous generator wind power

- system,” in *2016 IEEE/IAS 52nd Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I CPS)*, 2016, pp. 1–9.
- [15] H. Q. Minh, N. Frederic, N. Essounbouli, and H. Abdelaziz, “A new MPPT method for stand-alone wind energy conversion system,” in *2012 2nd International Symposium on Environment Friendly Energies and Applications (EFEA)*, 2012, pp. 335–340.
 - [16] G. D’Amico, F. Petroni, and F. Prattico, “First and second order semi-Markov chains for wind speed modeling,” *Phys. A*, vol. 392, pp. 1194–1201, 2013.
 - [17] Q. Hu, P. Su, D. Yu, and J. Liu, “Pattern-Based Wind Speed Prediction Based on Generalized Principal Component Analysis,” *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 5, no. 3, pp. 866–874, Jul. 2014.
 - [18] F. O. Hocaoglu, O. N. Gerek, and M. Kurban, “The Effect of Markov Chain State Size for Synthetic Wind Speed Generation,” in *Proceedings of the 10th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, 2008. PMAPS ’08*, 2008, pp. 1–4.
 - [19] M. Lei, L. Shiyan, J. Chuanwen, L. Hongling, and Z. Yan, “A review on the forecasting of wind speed and generated power,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, no. 4, pp. 915–920, May 2009.
 - [20] H. B. Azad, S. Mekhilef, and V. G. Ganapathy, “Long-Term Wind Speed Forecasting and General Pattern Recognition Using Neural Networks,” *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 5, no. 2, pp. 546–553, Apr. 2014.
 - [21] R. Velo, P. López, and F. Maseda, “Wind speed estimation using multilayer perceptron,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 81, pp. 1–9, May 2014.
 - [22] A. M. Howlader, N. Urasaki, A. Yona, T. Senjyu, and A. Y. Saber, “A review of output power smoothing methods for wind energy conversion systems,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 26, pp. 135–146, Oct. 2013.
 - [23] J. V. de Vyver, J. D. M. D. Kooning, B. Meersman, T. L. Vandoorn, and L. Vandeveldel, “Optimization of constant power control of wind turbines to provide power reserves,” in *Power Engineering Conference (UPEC), 2013 48th International Universities’*, 2013, pp. 1–6.
 - [24] D. Kumar and K. Chatterjee, “A review of conventional and advanced MPPT algorithms for wind energy systems,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 55, pp. 957–970, Mar. 2016.
 - [25] V. Patel, A. Kumar, K. Chatterje, and V. Patel, “A review: Maximum power extraction method in wind turbine system using different algorithm,” in *2015 International Conference on Electrical, Electronics, Signals, Communication and Optimization (EESCO)*, 2015, pp. 1–6.
 - [26] S. Behera, S. Sahoo, and B. B. Pati, “A review on optimization algorithms and application to wind energy integration to grid,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 48, pp. 214–227, Aug. 2015.
 - [27] Y. Daili, J.-P. Gaubert, and L. Rahmani, “Implementation of a new maximum power point tracking control strategy for small wind energy conversion systems without mechanical sensors,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 97, pp. 298–306, Jun. 2015.
 - [28] Y. Tsubota, G. Baba, K. Uchida, T. Jintsugawa, and Y. Nakanishi, “Reference governor for output smoothing of renewable energy generation,” in *Control Conference (ASCC), 2013 9th Asian*, 2013, pp. 1–8.

- [29] Z. Wang, C. Cai, and K. Jia, "Neural network adaptive control for constant output power of variable pitch *wind turbine*," in *Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety*, 2013, pp. 165–170.
- [30] D. Bansal and K. Pandey, "Blade pitch angle and tip speed ratio control schemes for constant power generation of WECS," in *2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES)*, 2016, pp. 1–6.
- [31] C. Viveiros, R. Melício, J. M. Igreja, and V. M. F. Mendes, "Supervisory control of a variable speed *wind turbine* with doubly fed induction generator," *Energy Rep.*, vol. 1, pp. 89–95, Nov. 2015.
- [32] V. R. R. Rudraraju, C. Nagamani, and S. I. Ganesan, "A Control Strategy for Reliable Power Output From a Stand-alone WRIG With Battery-Supported DC Link," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 32, no. 6, pp. 4334–4343, Jun. 2017.
- [33] R. Sarrias, L. M. Fernandez, C. A. Garcia, and F. Jurado, "Supervisory control system for DFIG *wind turbine* with energy storage system based on battery," in *2011 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG)*, 2011, pp. 1–6.
- [34] N. Mendis, K. M. Muttaqi, S. Sayeef, and S. Perera, "Standalone Operation of *Wind turbine*-Based Variable Speed Generators With Maximum Power Extraction Capability," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 27, no. 4, pp. 822–834, Dec. 2012.
- [35] M. A. Abdullah, A. H. M. Yatim, C. W. Tan, and R. Saidur, "A review of maximum power point tracking algorithms for wind energy systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 5, pp. 3220–3227, Jun. 2012.
- [36] A. G. Aissaoui, A. Tahour, N. Essounbouli, F. Nollet, M. Abid, and M. I. Chergui, "A Fuzzy-PI control to extract an optimal power from *wind turbine*," *Energy Convers. Manag.*, vol. 65, pp. 688–696, Jan. 2013.
- [37] J. P. Ram, N. Rajasekar, and M. Miyatake, "Design and overview of maximum power point tracking techniques in wind and solar photovoltaic systems: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 73, pp. 1138–1159, Jun. 2017.
- [38] Y. Izumi *et al.*, "A fuzzy-based output power smoothing of WECS using short-term ahead prediction of wind speed," in *2011 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ)*, 2011, pp. 2414–2419.
- [39] P. Garasi, M. Watanabe, and Y. Mitani, "Power smoothing of *wind turbine* generator using Fuzzy-PI pitch angle controller," in *Power Engineering Conference (AUPEC), 2014 Australasian Universities*, 2014, pp. 1–5.
- [40] R. Sarrias-Mena, L. M. Fernández-Ramírez, C. A. García-Vázquez, and F. Jurado, "Fuzzy logic based power management strategy of a multi-MW doubly-fed induction generator *wind turbine* with battery and ultracapacitor," *Energy*, vol. 70, pp. 561–576, Jun. 2014.
- [41] O. Carranza, E. Figueres, G. Garcerá, and R. Gonzalez-Medina, "Analysis of the control structure of wind energy generation systems based on a permanent magnet synchronous generator," *Appl. Energy*, vol. 103, pp. 522–538, Mar. 2013.

- [42] A. S. Satpathy, N. K. Kishore, D. Kastha, and N. C. Sahoo, "Control Scheme for a Stand-Alone Wind Energy Conversion System," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 29, no. 2, pp. 418–425, Jun. 2014.
- [43] A. Bertašienė and B. Azzopardi, "Synergies of *wind turbine* control techniques," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 45, pp. 336–342, May 2015.
- [44] Y. Soufi, S. Kahla, and M. Bechouat, "Feedback linearization control based particle swarm optimization for maximum power point tracking of *wind turbine* equipped by PMSG connected to the grid," *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 41, no. 45, pp. 20950–20955, Dec. 2016.
- [45] R. Tiwari and N. R. Babu, "Recent developments of control strategies for wind energy conversion system," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 66, pp. 268–285, Dec. 2016.
- [46] A. W. Manyonge, R. M. Ochieng, F. N. Onyango, and J. M. Shichikha, "Mathematical modelling of *wind turbine* in a wind energy conversion system: Power coefficient analysis," *Appl. Math. Sci.*, vol. 6, no. 91, pp. 4527–4536, 2012.
- [47] Wu Bin, Lang Y., Zargari N., Kouro S. Power Conversion And Control of Wind Energy System. IEEE Press. John Wiley & Sons Publication, 2011.
- [48] S. N. Mohammad, N. K. Das, and S. Roy, "A review of the state of the art of generators and power electronics for wind energy conversion systems," in *Developments in Renewable Energy Technology (ICDRET), 2014 3rd International Conference on the*, 2014, pp. 1–6.
- [49] F. Jaramillo-Lopez, G. Kenne, and F. Lamnabhi-Lagarrigue, "A novel online training neural network-based algorithm for wind speed estimation and adaptive control of PMSG *wind turbine* system for maximum power extraction," *Renew. Energy*, vol. 86, pp. 38–48, Feb. 2016.
- [50] J. G. Njiri and D. Söffker, "State-of-the-art in *wind turbine* control: Trends and challenges," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 60, pp. 377–393, Jul. 2016.
- [51] R. Llorente Iglesias, R. Lacal Arantegui, and M. Aguado Alonso, "Power electronics evolution in *wind turbines*—A market-based analysis," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 9, pp. 4982–4993, Dec. 2011.
- [52] Z. Chen, X. Xiao, H. Wang, and M. Liu, "Analysis of converter topological structure for direct-drive wind power system with PMSG," in *2010 International Conference on Power System Technology (POWERCON)*, 2010.
- [53] R. Melício, V. M. F. Mendes, and J. P. S. Catalão, "Power converter topologies for wind energy conversion systems: Integrated modeling, control strategy and performance simulation," *Renew. Energy*, vol. 35, no. 10, pp. 2165–2174, Oct. 2010.
- [54] T. R. S. de Freitas, P. J. M. Menegáz, and D. S. L. Simonetti, "Rectifier topologies for permanent magnet synchronous generator on wind energy conversion systems: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 54, pp. 1334–1344, Feb. 2016.
- [55] P. Szcześniak and J. Kaniewski, "Power electronics converters without DC energy storage in the future electrical power network," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 129, pp. 194–207, Dec. 2015.

- [56] F. Merahi and E. M. Berkouk, "Back-to-back five-level converters for wind energy conversion system with DC-bus imbalance minimization," *Renew. Energy*, vol. 60, pp. 137–149, Dec. 2013.
- [57] R. Aubrée, F. Auger, M. Macé, and L. Loron, "Design of an efficient small wind-energy conversion system with an adaptive sensorless MPPT strategy," *Renew. Energy*, vol. 86, pp. 280–291, Feb. 2016
- [58] Z. Xuesong, L. Ji, and M. Youjie, "Review on wind speed model research in wind power systems dynamic analysis," in *International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, 2009. SUPERGEN '09*, 2009, pp. 1–5.
- [59] D. R. Chandra, M. S. Kumari, and M. Sydulu, "A detailed literature review on wind forecasting," in *2013 International Conference on Power, Energy and Control (ICPEC)*, 2013, pp. 630–634.
- [60] H. Aksoy, F. Z. Toprak, A. Aytek, and E. Unal, "Stochastic Generation of Hourly Mean Wind Speed Data," *Renew. Energy*, vol. 29, pp. 2111–2131, 2004.
- [61] F. O. Hocaoglu, Ö. N. Gerek, and M. Kurban, "A novel wind speed modeling approach using atmospheric pressure observations and hidden Markov models," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 98, no. 8–9, pp. 472–481, Aug. 2010.
- [62] E. Cadenas and W. Rivera, "Short term wind speed forecasting in La Venta, Oaxaca, México, using artificial neural networks," *Renew. Energy*, vol. 34, no. 1, pp. 274–278, Jan. 2009.
- [63] X. Hai-yan and W. Yan, "Workflow model based on stochastic Petri nets and performance evaluation," in *IEEE International Symposium on IT in Medicine Education, 2009. ITIME '09*, 2009, vol. 1, pp. 245–249.
- [64] T. Murata, "Petri nets: Properties, analysis and applications," *Proc. IEEE*, vol. 77, no. 4, pp. 541–580, Apr. 1989.
- [65] Y. Xia, Y. Liu, J. Liu, and Q. Zhu, "Modeling and Performance Evaluation of BPEL Processes: A Stochastic-Petri-Net-Based Approach," *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Part Syst. Hum.*, vol. 42, no. 2, pp. 503–510, Mar. 2012.
- [66] D. Lefebvre and E. Leclercq, "Stochastic Petri Net Identification for the Fault Detection and Isolation of Discrete Event Systems," *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Part Syst. Hum.*, vol. 41, no. 2, pp. 213–225, Mar. 2011.
- [67] Ratna Ika Putri, Ardyono Priyadi, Mauridhi Hery Purnomo, "Stochastic Petri Nets For Very Short Term Wind Speed Modeling", *2015 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Virtual Environment For Measurement System And Application (CIVEMSA)*, Shenzhen, China, 12-14 June 2015.
- [68] Ratna Ika Putri, Lie Jasa, Margo Pujiantoro, Ardyono Priyadi, Mauridhi Hery Purnomo, "Tuning PI Controller Based on Multiobjective Optimization Approaches for Speed Control of PMSG Wind turbine", *International Review of Automatic Control (IREACO)* Vol. 8, No. 4, pp: 315-321, July 2015.
- [69] A. Rolan, A. Luna, G. Vazquez, D. Aguilar, and G. Azevedo, "Modeling of a variable speed wind turbine with a Permanent Magnet Synchronous Generator," in *IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2009. ISIE 2009*, 2009, pp. 734–739.

- [70] M. Yin, G. Li, M. Zhou, and C. Zhao, "Modeling of the *Wind turbine* with a Permanent Magnet Synchronous Generator for Integration," in *IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2007*, 2007, pp. 1–6.
- [71] A. M. El-Sebaili, M. S. Hamad, and A. A. Helal, "A sensorless MPPT technique for a grid-connected PMSG *wind turbine* system," in *2nd IET Renewable Power Generation Conference (RPG 2013)*, 2013, pp. 1–6.
- [72] Y. Xia, K. H. Ahmed, and B. W. Williams, "A New Maximum Power Point Tracking Technique for Permanent Magnet Synchronous Generator Based Wind Energy Conversion System," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, no. 12, pp. 3609–3620, Dec. 2011.
- [73] J. S. Thongam, R. Beguenane, A. F. Okou, M. Tarbouchi, A. Merabet, and P. Bouchard, "A method of tracking maximum power points in variable speed wind energy conversion systems," in *2012 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*, 2012, pp. 1095–1100.
- [74] N. Phankong, S. Manmai, K. Bhumkittipich, and P. Nakawiwat, "Modeling of Grid-connected with Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) Using Voltage Vector Control," *Energy Procedia*, vol. 34, pp. 262–272, 2013.
- [75] E. N. Lopez-Ortiz, D. Campos-Gaona, and E. L. Moreno-Goytia, "Modelling of a *wind turbine* with permanent magnet synchronous generator," in *North American Power Symposium (NAPS), 2012*, 2012, pp. 1–6.
- [76] J. C. Y. Hui, A. Bakhshai, and P. K. Jain, "A Sensorless Adaptive Maximum Power Point Extraction Method With Voltage Feedback Control for Small *Wind turbines* in Off-Grid Applications," *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 3, no. 3, pp. 817–828, Sep. 2015.
- [77] T. Hadjina, M. Baotic, and N. Peric, "Control of the grid side converter in a *wind turbine*," in *2013 36th International Convention on Information Communication Technology Electronics Microelectronics (MIPRO)*, 2013, pp. 925–930.
- [78] M. Benadja and A. Chandra, "Sensorless control for wind energy conversion system (WECS) with power quality improvement," in *2014 IEEE PES General Meeting / Conference Exposition*, 2014, pp. 1–5.
- [79] M. Hussein, T. Senjyu, M. Orabi, M. Wahab, and M. Hamada, "Control of a Stand-Alone Variable Speed Wind Energy Supply System †," *Appl. Sci.*, vol. 3, no. 2, pp. 437–456, Apr. 2013.
- [80] Z. M. Dalala, Z. U. Zahid, W. Yu, Y. Cho, and J.-S. Lai, "Design and Analysis of an MPPT Technique for Small-Scale Wind Energy Conversion Systems," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 28, no. 3, pp. 756–767, Sep. 2013.
- [81] A. Mesemanolis, C. Mademlis, and I. Kioskeridis, "Maximum efficiency of a Wind Energy Conversion system with a PM Synchronous Generator," in *7th Mediterranean Conference and Exhibition on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MedPower 2010)*, 2010, pp. 1–9.
- [82] A. J. Mahdi, W. H. Tang, and Q. H. Wu, "Estimation of tip speed ratio using an adaptive perturbation and observation method for *wind turbine*

- generator systems,” in *IET Conference on Renewable Power Generation (RPG 2011)*, 2011, pp. 1–6.
- [83] M. A. Abdullah, A. H. M. Yatim, and C. W. Tan, “A study of maximum power point tracking algorithms for wind energy system,” in *2011 IEEE First Conference on Clean Energy and Technology (CET)*, 2011, pp. 321–326.
 - [84] A. M. Eltamaly and H. M. Farh, “Maximum power extraction from wind energy system based on fuzzy logic control,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 97, pp. 144–150, Apr. 2013.
 - [85] N. Adhikari, B. Singh, and A. L. Vyas, “Design of a standalone wind energy conversion system using sensorless MPPT approach,” in *2012 IEEE Third International Conference on Sustainable Energy Technologies (ICSET)*, 2012, pp. 409–414.
 - [86] A. J. Mahdi, W. H. Tang, and Q. H. Wu, “Novel perturbation and observation algorithms for variable-speed wind turbine generator systems,” in *2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2012, pp. 1–8.
 - [87] K. L. Lian, J. H. Jhang, and I. S. Tian, “A Maximum Power Point Tracking Method Based on Perturb-and-Observe Combined With Particle Swarm Optimization,” *IEEE J. Photovolt.*, vol. 4, no. 2, pp. 626–633, Mar. 2014.
 - [88] M. A. Abdullah, A. H. M. Yatim, C. W. Tan, and A. S. Samosir, “Particle swarm optimization-based maximum power point tracking algorithm for wind energy conversion system,” in *2012 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon)*, 2012, pp. 65–70.
 - [89] S. Kahla, Y. Soufi, M. Sedraoui, and M. Bechouat, “On-Off control based particle swarm optimization for maximum power point tracking of wind turbine equipped by DFIG connected to the grid with energy storage,” *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 40, no. 39, pp. 13749–13758, Oct. 2015.
 - [90] C. Kongnam and S. Nuchprayoon, “A particle swarm optimization for wind energy control problem,” *Renew. Energy*, vol. 35, no. 11, pp. 2431–2438, Nov. 2010.
 - [91] A. Mehdi, H. Medouce, S. eddine Rezgui, A. Boulahia, F. Mehazzem, and H. Benalla, “PWM Converters and its Application to the Wind-energy Generation,” *Energy Procedia*, vol. 42, pp. 523–529, 2013.
 - [92] J. Kennedy and R. Eberhart, “Particle swarm optimization,” in *IEEE International Conference on Neural Networks, 1995. Proceedings, 1995*, vol. 4, pp. 1942–1948 vol.4.
 - [93] I. Fister, I. Fister Jr., X.-S. Yang, and J. Brest, “A comprehensive review of Firefly algorithms,” *Swarm Evol. Comput.*, vol. 13, pp. 34–46, Dec. 2013.
 - [94] T. Chakrabarti, U. Sharma, S. Manna, T. Chakrabarti, and S. K. Sarkar, “Design of intelligent Maximum Power Point Tracking (MPPT) technique based on swarm intelligence based algorithms,” in *2015 International Conference on Power and Advanced Control Engineering (ICPACE)*, 2015, pp. 173–177.
 - [95] K. Sundareswaran, S. Peddapati, and S. Palani, “MPPT of PV Systems Under Partial Shaded Conditions Through a Colony of Flashing Fireflies,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 29, no. 2, pp. 463–472, Jun. 2014.

- [96] S.-R. Massan, A. I. Wagan, M. M. Shaikh, and R. Abro, "Wind turbine micrositeing by using the *Firefly* algorithm," *Appl. Soft Comput.*, vol. 27, pp. 450–456, Feb. 2015.
- [97] I. Fister, X.-S. Yang, J. Brest, and I. Fister Jr., "Modified *Firefly* algorithm using quaternion representation," *Expert Syst. Appl.*, vol. 40, no. 18, pp. 7220–7230, Dec. 2013.
- [98] A. Baykasoğlu and F. B. Ozsoydan, "An improved *Firefly* algorithm for solving dynamic multidimensional knapsack problems," *Expert Syst. Appl.*, vol. 41, no. 8, pp. 3712–3725, Jun. 2014.
- [99] Irwan Mahmudi, Ratna Ika Putri, Margo Pujiantoro, Ardyono Priyadi, Mauridhi Hery Purnomo, "Modified *Firefly* Algorithm For Maximum Power Point Tracking of a Small Stand Alone Wind Power System", *2016 Internatinal Seminar On Intelligent Technology And Its Application (ISITIA)*, Lombok, Indonesia, pp: 551 - 555, 28 – 30 July 2016.
- [100] K. Padmanabham and K. B. N. K. Reddy, "A New MPPT Control Algorithm for Wind Energy Conversion System," in *International Journal of Engineering Research and Technology*, 2015, vol. 4.
- [101] A. Harrag and S. Messalti, "Variable step size *modified* P&O MPPT algorithm using GA-based hybrid offline/online PID controller," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 49, pp. 1247–1260, Sep. 2015.
- [102] H. Fathabadi, "Novel high efficient speed sensorless controller for maximum power extraction from wind energy conversion systems," *Energy Convers. Manag.*, vol. 123, pp. 392–401, Sep. 2016.
- [103] H. Fathabadi, "Maximum mechanical power extraction from *wind turbines* using novel proposed high accuracy single-sensor-based maximum power point tracking technique," *Energy*, vol. 113, pp. 1219–1230, Oct. 2016.
- [104] L. Li, B. Han, Y. Ren, J. Brindley, and L. Jiang, "An improved hybrid hill climb searching control for MPPT of wind power generation systems under fast varying wind speed," 2015.
- [105] L. A. Torres-Salomao and H. Gámez-Cuatzin, "Fuzzy logic control and PI control comparison for a 1.5 MW horizontal axis *wind turbine*," in *2012 16th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*, 2012, pp. 1–6.
- [106] Y. Lakhali, F. Z. Baghli, and L. E. Bakkali, "Fuzzy Logic Control Strategy for Tracking the Maximum Power Point of a Horizontal Axis *Wind turbine*," *Procedia Technol.*, vol. 19, pp. 599–606, 2015.
- [107] C. Bhattacharjee and B. K. Roy, "Advanced fuzzy power extraction control of wind energy conversion system for power quality improvement in a grid tied hybrid generation system," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 10, no. 5, pp. 1179–1189, 2016.
- [108] J. Lee and Y.-S. Kim, "Sensorless fuzzy-logic-based maximum power point tracking control for a small-scale wind power generation systems with a switched-mode *rectifier*," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 10, no. 2, pp. 194–202, 2016.
- [109] A. G. Aissaoui, A. Tahour, M. Abid, N. Essounbouli, and F. Nollet, "Power Control of *Wind turbine* based on Fuzzy Controllers," *Energy Procedia*, vol. 42, pp. 163–172, 2013.

- [110] A. E. Yaakoubi, A. Asselman, A. Djebli, and E. H. Aroudam, "A MPPT Strategy Based on Fuzzy Control for a Wind Energy Conversion System," *Procedia Technol.*, vol. 22, pp. 697–704, 2016.
- [111] D. Petrila, F. Blaabjerg, N. Muntean, and C. Lascu, "Fuzzy logic based MPPT controller for a small *wind turbine* system," in *2012 13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)*, 2012, pp. 993–999.
- [112] M. Karbakhsh, H. Abutorabi, and A. Khazaei, "An enhanced MPPT fuzzy control of a *wind turbine* equipped with permanent magnet synchronous generator," in *2012 2nd International eConference on Computer and Knowledge Engineering (ICCCKE)*, 2012, pp. 77–82.
- [113] Ratna Ika Putri, M. Rifa'i, Margo Pujiatnoro, Ardyono Priyadi, Mauridhi Hery Purnomo, "Fuzzy MPPT Controller For Small Scale Stand Alone PMSG *Wind turbine*", *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences* Vol. 12, No. 1, pp: 188-193, January 2017.
- [114] N. Mendis, K. M. Muttaqi, and S. Perera, "Management of Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage and Synchronous Condenser for Isolated Operation of PMSG Based Variable-Speed *Wind turbine* Generating Systems," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 2, pp. 944–953, Mar. 2014.
- [115] M. M. Hussein, T. Senjyu, M. Orabi, M. A. A. Wahab, and M. M. Hamada, "Control of a grid connected variable speed wind energy conversion system," in *2012 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, 2012, pp. 1–5.
- [116] Y. Mishra, S. Mishra, and F. Li, "Coordinated Tuning of DFIG-Based *Wind turbines* and Batteries Using Bacteria Foraging Technique for Maintaining Constant Grid Power Output," *IEEE Syst. J.*, vol. 6, no. 1, pp. 16–26, Mar. 2012.
- [117] Margo Pujiatnara, Ratna Ika Putri, Antonius Ario, Iwan Setiawan, Sidarjanto, Ardyono Priyadi, Mauridhi Hery Purnomo, "Output Power Smoothing of Doubly Fed Induction Generator *Wind turbine* Using Very Short Term Wind Speed Prediction Based on Lavenberg Marquardt Neural Network", *International Review On Modeling and Simulations (IREMOS)* Vol. 8, No. 8, pp: 558-565, October 2015.
- [118] M. Nasiri, J. Milimonfared, and S. H. Fathi, "A review of low-voltage ride-through enhancement methods for permanent magnet synchronous generator based *wind turbines*," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 47, pp. 399–415, Jul. 2015.
- [119] M. M. Hossain and M. H. Ali, "Future research directions for the *wind turbine* generator system," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 49, pp. 481–489, Sep. 2015.
- [120] D. Rekioua, "Wind Power Electric Systems," *Green Energy Technol. Lond. Springer*, 2014.
- [121] K. Suresh and D. R. Arulmozhiyal, "Design and Implementation of Bi-Directional DC-DC Converter for Wind Energy System," *Circuits Syst.*, vol. 07, no. 11, pp. 3705–3722, 2016.

- [122] C. N. Bhende, S. Mishra, and S. G. Malla, "Permanent Magnet Synchronous Generator-Based Standalone Wind Energy Supply System," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 2, no. 4, pp. 361–373, Oct. 2011.
- [123] G. Xu, L. Xu, and J. Morrow, "Power oscillation damping using *wind turbines* with energy storage systems," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 7, no. 5, pp. 449–457, Sep. 2013.
- [124] G. Xu, L. Xu, D. J. Morrow, and D. Chen, "Coordinated DC Voltage Control of *Wind turbine* With Embedded Energy Storage System," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 27, no. 4, pp. 1036–1045, Dec. 2012.
- [125] Ratna Ika Putri, Margo Pujiantara, Ardyono Priyadi, Mauridhi Hery Purnomo, "Optimum Control Strategy of Grid Connected PMSG *Wind turbine* Based on Energy Storage System", *2016 Internatinal Seminar On Intelligent Technology And Its Application (ISITIA)*, pp: 623 - 628, Lombok, Indonesia, 28 – 30 July 2016.
- [126] Ratna Ika Putri, M. Rifa'i, Lie Jasa, Margo Pujiantoro, Ardyono Priyadi, Mauridhi Hery Purnomo, "Modeling and Control of Permanent Magnet Synchronous Generator Variable Speed *Wind turbine*", *2016 International Conference on Smart Green Technology in Electrical and Information Systems (ICSGTEIS)* , pp: 16 - 20, Bali, Indonesia, 6 – 8 October 2016.
- [127] Rachma Prillian E, Ratna Ika Putri, Margo Pujiantoro, Ardyono Priyadi, Mauridhi Hery Purnomo, "Controlled bidirectional converter using PID for charging battery in the stand-alone *wind turbine* system with Modified P&O to obtain MPPT", *2017 International Conference on Green Energy and Applications (ICGEA)*, pp: 69 - 73, Singapore, 22 – 24 march 2017.

BIODATA PENULIS



Ratna Ika Putri, anak pertama dari pasangan Imam Sardju dan Setiarsih. Penulis lahir di Balikpapan pada tanggal 22 Oktober. Penulis memulai pendidikannya dari SDN 054 Balikpapan, SMP Negeri 1 Balikpapan, dan SMA Negeri 1 Malang. Setelah lulus dari SMA pada tahun 1994, penulis melanjutkan studi di Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya Malang dan melanjutkan studi S2 di Universitas Brawijaya Malang. Sejak

tahun 2000 penulis bekerja sebagai dosen di program studi teknik elektronika jurusan teknik elektro Politeknik Negeri Malang hingga saat ini. Kemudian penulis melanjutkan studi S3 di Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Penulis selama kuliah S3 menjadi member di Laboratorium Instrumentasi Pengukuran dan Identifikasi Sistem Tenaga (LIPIST). Penulis dapat dihubungi melalui alamat email ikaputri_ratna@yahoo.com.

